

Titre: Caractérisation hydrogéotechnique des roches stériles tamisées et compactées à l'aide d'essais de laboratoire à une échelle intermédiaire
Title:

Auteur: Isabelle Lévesque
Author:

Date: 2015

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Lévesque, I. (2015). Caractérisation hydrogéotechnique des roches stériles tamisées et compactées à l'aide d'essais de laboratoire à une échelle intermédiaire [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/2052/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/2052/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Michel Aubertin, & Bruno Bussière
Advisors:

Programme: Génie minéral
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CARACTÉRISATION HYDROGÉOTECHNIQUE DES ROCHES STÉRILES TAMISÉES
ET COMPACTÉES À L'AIDE D'ESSAIS DE LABORATOIRE À UNE ÉCHELLE
INTERMÉDIAIRE

ISABELLE LÉVESQUE

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MINÉRAL)

DÉCEMBRE 2015

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

CARACTÉRISATION HYDROGÉOTECHNIQUE DES ROCHES STÉRILES TAMISÉES
ET COMPACTÉES À L'AIDE D'ESSAIS DE LABORATOIRE À UNE ÉCHELLE
INTERMÉDIAIRE

présenté par : LÉVESQUE Isabelle

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. LI Li, Doctorat, président

M. AUBERTIN Michel, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. BUSSIÈRE Bruno, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

M. JAMES Michael, Ph. D., membre

DÉDICACE

À toute l'équipe du programme pour les traumatismes cranio-cérébraux légers du Centre de réadaptation Lucie-Bruneau qui m'a permis de traverser le désert et les tempêtes de sable suite à mon accident. Vous m'avez permis de reprendre mes études pour finalement remettre ce mémoire de maîtrise.

C'est une grande victoire!

REMERCIEMENTS

En premier lieu, mes remerciements s'adressent à Michel Aubertin, mon directeur de recherche, pour sa disponibilité, son implication et surtout pour toutes les connaissances transmises. Je remercie aussi Bruno Bussière, mon codirecteur de recherche, pour m'avoir mis en contact avec Michel Aubertin et pour m'avoir encouragé à entamer ces études supérieures. Je tiens aussi à remercier Michel et Bruno pour leurs qualités humaines et leur constante bienveillance à mon égard. Je voudrais aussi remercier Robert Chapuis pour ses précieux conseils concernant mon projet ainsi que Noura El-Harrak, Fernando Medina, Monica Monzon, Richard Toussaint, Abtin Jahanbakhshzadeh, Karim Essayad, Anna Peregoedova, Vincent Martin, Stefan Broda et Simon Weber et les étudiants en stage pour leur aide au laboratoire.

Merci à tous les collègues étudiants et étudiantes pour leur générosité, leur intégrité et les lunches en bonne compagnie. Les pauses-café et les dîners en groupe avec l'ensemble des étudiants seront toujours un souvenir agréable dans ma mémoire. Aussi un merci à Manon Latour pour la gestion de mon dossier étudiant avec toute la finesse requise.

Je tiens également à remercier mes amis (Monica, Richard, Valérie, Marie-Pier, Manon, Jennifer) et ma famille (parents, frères, soeur, tantes, oncle et beaux-parents) qui ont été fidèles et un précieux soutien pendant cette aventure. Un remerciement particulier à Manon qui m'a beaucoup aidé avec ses prouesses dans MSWord, et Richard qui a su rationaliser mes attentes et ardeurs à plusieurs reprises. Finalement, un merci spécial à Monica et mon conjoint Hervé qui ont su gérer les hauts et les bas quotidiens de la dernière année et qui m'ont offert un support indispensable.

RÉSUMÉ

La gestion des rejets miniers reste encore aujourd'hui un enjeu important dans l'industrie minière. Les stériles sont des roches minées n'ayant pas de valeur économique viable pour en justifier la transformation. Elles sont généralement placées dans des empilements appelés des haldes. Les haldes à stériles sont placées en surface et deviennent une partie intégrante du système hydrologique régional. La production de drainage minier acide [DMA] et de drainage neutre contaminé [DNC] sont les enjeux environnementaux pour les roches stériles. Pour améliorer les méthodes de gestion des haldes à stériles, il est important d'observer et de comprendre scientifiquement leur comportement hydrogéologique sous différentes configurations.

Le projet consiste à caractériser les propriétés physiques et hydrogéologiques des roches stériles tamisées compactées qui sont angulaires, hétérogènes, avec une granulométrie étalée. Les résultats obtenus seront utiles pour la planification d'essais de terrain et la simulation numériques pour une halde à stériles expérimentale à la Mine du Lac Tio appartenant à la compagnie minière Rio Tinto Fer et Titane [RTFT]. Cette mine est aux prises avec un problème de DNC où la concentration en nickel (Ni), peut dépasser les normes environnementales en vigueur. La mine du Lac Tio est une mine à ciel ouvert qui exploite le plus grand gisement d'hématite-ilménite et hémio-ilménite au monde. Les roches stériles tamisées utilisées dans le projet présenté dans ce mémoire proviennent de la halde Petit-Pas située au nord du site. Les roches stériles tamisées sont classifiées comme un sable angulaire, contenant un peu de silt (SW-SM selon le système unifié); sa granulométrie est étalée (coefficient d'uniformité, $C_U = 17,9$).

Les objectifs spécifiques du projet incluent l'élaboration d'une procédure visant à caractériser les propriétés hydrogéotechnique des roches stériles tamisées en fonction du degré de compactage; déterminer les instruments disponibles ayant les propriétés recherchées qui pourront être utilisées pour observer le comportement hydrogéologique des roches stériles compactées lors d'essais d'infiltration dans un modèle physique; caractériser les fonctions de rétention d'eau et de perméabilité du matériau non saturée; et analyser les conditions d'écoulement par modélisation numérique; d'analyser les résultats obtenus des essais en

laboratoire et les comparer avec les résultats anticipés avec les modèles prédictifs et la modélisation numérique.

Le matériau a été soumis à des essais en laboratoire avec nouveau protocole d'essai dans une grande cuve cylindrique sous trois degrés de compactage. Les instruments de mesure ont été calibrés selon les besoins pour mesurer indirectement la teneur en eau volumique, la charge d'eau appliquée pendant les essais et la pression (suction matricielle).

Les méthodes utilisées pour les essais en cuve et en colonnes sont systématiques et reproductives, ce qui permet d'étudier le comportement des roches stériles à une échelle intermédiaire. Les protocoles expérimentaux semblent valides, car les résultats suivent des tendances comparables à la théorie, aux méthodes de prédiction et aux simulations numériques. L'échelle intermédiaire des essais en cuve de laboratoire permet d'évaluer le comportement en considérant les processus hydrogéologiques horizontaux et verticaux, alors que les essais en colonnes permettent surtout d'isoler les propriétés hydrogéologiques selon l'axe vertical.

Les résultats des essais en cuve et en colonne pourront être utilisés afin de mener des simulations numériques pour des analyses inverses visant à évaluer les propriétés non saturées du matériau, pour divers degrés de compactage. Certains résultats obtenus ici sont conformes aux attentes, alors que d'autres nécessitent des analyses plus poussées pour mieux comprendre les caractéristiques des matériaux. Une bonne évaluation de l'impact du compactage pourrait permettre un meilleur contrôle de l'infiltration dans une halde à stérile comportant une couche de matériau de ce type.

ABSTRACT

Mine waste management still remains an important issue in the mining industry. The waste rock is mined rock with no viable economic value to justify processing, and is usually placed in stacks called waste rock piles. Waste rock piles are often placed on the surface and become part of the regional water system. In the case of waste rock piles, the production of acid mine drainage [AMD] and contaminated neutral mine drainage [CND] are the main issues. To improve methods of managing waste rock piles, it is important to observe and scientifically understand the hydrogeological behavior of piles under different configurations.

The project is to characterize the physical and hydrogeological properties of waste rock that are sieved, compacted, angular, heterogeneous, and poorly graded. The results obtained will be used for the field trials planning and numerical modeling for an experimental waste rock pile at the Lac Tio Mine belonging to Rio Tinto Fer & Titane [RTFT]. This mine is facing a problem where the CND of nickel concentration (Ni), at some points, may exceed environmental standards. Lac Tio Mine is an open pit mine that exploits an ilmenite-hematite deposit and hemo-ilmenite which is the largest deposit of this mineral in the world. The sieved waste rocks used in this project, are from the Petit-Pas waste rock pile located north of the site. Grain size distribution tests determined that by the unified soil classification system (USCS), the waste rock is classified as such; poorly graded angular sand with some silt (SW-SM) (uniformity coefficient, $C_U = 17.9$).

The specific objectives are, among others, to develop a procedure that will provide for realistic characterization of waste rock hydrogeotechnic properties as a function of the degree of compaction; determine which instruments commercially available with the desired properties can be used to observe the hydrogeological behavior of compacted waste rock during infiltration tests in a physical model; characterisation of the water retention curves and hydraulic conductivity functions for the unsaturated material; analyse the flow conditions by numerical modeling and predictive models; analyse the laboratory testing results and compare them with the results of the predictive models and numerical modelling.

The material was tested in the laboratory with a new protocol in a large vertical cylinder under different degrees of compaction. The measuring instruments were calibrated as required to

indirectly measure the volumetric water content, water content applied during testing and matric pressure.

The methods used for testing in the vertical cylinder and columns are systematic and reproducible, which allows for the study of waste rock behavior at the intermediate scale. The experimental protocols appear valid since the results are comparable to theory, prediction methods and numerical simulations. Intermediate scale vertical cylinder tests can help understand horizontal and vertical hydrogeological behavior of the material, while the column tests only allow the understanding of the vertical plane properties of the material.

The results obtained in the vertical cylinder and the column may be used to reverse numerical modeling and understand the unsaturated hydrogeological properties of the unsaturated material at various degrees of compaction. Some results obtained are in conformity with expectations, while others need further analyses to better understand the material's characteristics. A better understanding of the impact of compaction could allow the control of infiltration and of the material structure because the infiltration rate may be dependent on the degree of compaction and the applied water load.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ	V
ABSTRACT.....	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES	XVI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XXIV
LISTE DES ANNEXES	XXXI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	9
2.1 Principales caractéristiques des haldes à stériles	9
2.1.1 Méthodes de construction	9
2.1.2 Structure interne.....	12
2.2 Méthode d'évaluation de l'écoulement de l'eau dans les roches stériles	13
2.2.1 Équations de base.....	15
2.2.2 Essais de laboratoire pour l'évaluation des écoulements.....	16
2.3 Propriétés de base des roches stériles	18
2.3.1 Masse volumique, porosité et indice des vides	19
2.3.2 Granulométrie	20
2.3.3 Sphéricité-indice d'arrondi des particules	21
2.3.4 Propriétés hydrogéologiques.....	22

2.4	Recouvrement des haldes.....	35
2.4.1	Barrière capillaire.....	36
2.5	Simulations numériques.....	37
2.5.1	Logiciel SEEP/W	38
2.5.2	HYDRUS 2D	40
2.5.3	Distribution et écoulement de l'eau	41
2.6	Instrumentation	45
CHAPITRE 3 CARACTÉRISATION PRÉLIMINAIRE DES MATÉRIAUX		56
3.1	Généralités sur la méthodologie expérimentale	56
3.2	Matériau étudié	58
3.2.1	Composition minéralogique.....	59
3.3	Protocoles des essais standardisés	59
3.3.1	Distribution granulométrique.....	60
3.3.2	Densité relative des grains	65
3.3.3	Indice des vides prédits et mesurés	66
3.3.4	Conductivité hydraulique saturée	67
3.3.5	Poids volumique sec compacté	71
3.3.6	Caractérisation et prédiction des propriétés hydrogéologiques	74
CHAPITRE 4 PROTOCOLE DES ESSAIS EN CUVE ET EN COLONNE.....		79
4.1	Essais en colonnes.....	79
4.1.1	Méthodologie expérimentale	80
4.1.2	Essai de perméabilité en colonne	80
4.1.3	Essai de drainage libre en colonne.....	81
4.1.4	Mesure de la teneur en eau résiduelle	82

4.2	Essais en cuve	83
4.2.1	Préparation du matériau et compactage	87
4.2.2	Montage des essais d'infiltration	89
4.2.3	Compactage.....	90
4.2.4	Position des sondes et disposition de l'infiltromètre	94
4.2.5	Évaluation des caractéristiques des stériles	96
4.2.6	Réalisation des essais d'infiltration	98
4.2.7	Essais à charge constante	98
4.2.8	Essais à charge variable	104
4.2.9	Caractéristiques des essais d'infiltration.....	106
4.2.10	Démontage de la cuve	107
4.2.11	Évaluation des caractéristiques au démontage.....	108
CHAPITRE 5 PRINCIPAUX RÉSULTATS DES ESSAIS		110
5.1	Essai en colonne.....	110
5.1.1	Essais de perméabilité.....	118
5.1.2	Essais de drainage	125
5.1.3	Distribution granulométrique.....	131
5.2	Essais en cuve	133
5.2.1	Résultats des essais de drainage.....	137
5.2.2	Résultats des essais d'infiltration M3E3 et M3E4.....	164
CHAPITRE 6 INTERPRÉTATION, ANALYSES ET DISCUSSION		174
6.1	Généralités	174
6.2	Interprétation.....	175
6.2.1	Essais en cuve	175

6.2.2	Essais en colonne	185
6.3	Analyses numériques	187
6.3.1	Propriétés des matériaux	188
6.3.2	Modèle numérique	190
6.3.3	Résultats des simulations	192
6.4	Discussion	198
CHAPITRE 7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....		200
7.1	Conclusions.....	200
7.2	Recommandations.....	201
BIBLIOGRAPHIE.....		203
ANNEXES		213

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Liste partielle des types d'instruments utilisés pour déterminer la teneur en eau ou la succion matricielle des sols (Dane et Topp, 2002; Maqsoud et al., 2007).....	46
Tableau 2.2 : Méthodes de mesures indirectes pouvant être utilisées pour obtenir la teneur en eau volumique (Dane et Topp, 2002)	48
Tableau 2.3 : Méthodes de mesures indirectes pouvant être utilisées pour obtenir la succion matricielle (Dane et Topp, 2002)	50
Tableau 2.4 : Paramètres de chacun des instruments utilisés pour les essais.	52
Tableau 3.1 : Exemple de la masse requise pour chacune des fractions granulométriques pour la reconstitution de la distribution granulométrique d'un échantillon de 45 kg.	65
Tableau 3.2 : Résultats des essais au perméamètre à parois rigides selon la norme ASTM D2434 pour des essais à charge constante et variable : roches stériles anorthosite 0-10 mm.	70
Tableau 3.3 : Valeurs de la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) mesurées et prédites	74
Tableau 3.4 : Paramètres de la courbe de rétention d'eau (CRE) prédit par les modèles MK et MKs.....	76
Tableau 4.1 : Caractéristiques déterminées au montage de l'essai et avant d'amorcer l'essai d'infiltration; les méthodes et procédures associées aux caractéristiques sont aussi identifiées.....	84
Tableau 4.2 : Caractéristiques déterminées avant, pendant et après les essais d'infiltration; méthodes et procédures associées aux caractéristiques sont aussi identifiées.....	85
Tableau 4.3 : Caractéristiques déterminées au démontage de la cuve; les méthodes et procédures associées aux caractéristiques sont aussi identifiées.	86
Tableau 4.4 : Caractéristiques au montage pour chacun des essais en cuve sur les trois montages (M1, M2 et M3).....	87

Tableau 5.1 : Localisation des tensiomètres dans les deux colonnes et charge d'eau théorique en conditions saturées à chacun des emplacements	118
Tableau 5.2 : Résultats des essais de perméabilité à charge constante dans les colonnes A et B.	124
Tableau 5.3 : Propriétés de rétention d'eau et paramètres de la CRE selon les essais en colonnes et ajustés avec le code RETC (van Genuchten et al. 1991)	130
Tableau 5.4 : Conditions générales de chacun des montages des essais en cuve	137
Tableau 5.5 : Méthodes d'obtention des données initiales et corrigées pour les essais d'infiltration et de drainage en cuve	138
Tableau 5.6 : Localisation des sondes diélectriques pour le montage M1.....	139
Tableau 5.7 : Caractéristiques des essais réalisés avec le montage M1.....	140
Tableau 5.8 : Volumes mesurés avec chacune des méthodes à la fin de l'infiltration; on présente aussi le volume mesuré à l'exfiltration.....	141
Tableau 5.9 : Sommaire des principaux résultats des essais d'infiltration et de drainage pour le montage M1	144
Tableau 5.10 : Résultats de la caractérisation des roches stériles au démontage de M1 la cuve.	148
Tableau 5.11 : Localisation des sondes diélectriques pour le montage M2.....	150
Tableau 5.12 : Caractéristiques des roches stériles au montage M2.....	151
Tableau 5.13 : Caractéristiques des essais réalisés dans la cuve pour le montage M2.....	152
Tableau 5.14 : Sommaire des principaux résultats des essais d'infiltration et de drainage pour le montage M2	153
Tableau 5.15 : Résultats de la caractérisation des roches stériles au démontage de la cuve M2.	156
Tableau 5.16 : Localisation des sondes diélectriques pour le montage M3.....	158
Tableau 5.17 : Caractéristiques des roches stériles au montage M3.....	159

Tableau 5.18 : Caractéristiques des essais dans le montage M3.....	159
Tableau 5.19 : Sommaire des principaux résultats des essais d'infiltration et de drainage pour le montage M3	160
Tableau 5.20 : Sommaire des résultats de la caractérisation des roches stériles au démontage de la cuve M3.....	172
Tableau 6.1 : Prédiction de la conductivité hydraulique saturée à l'aide du modèle KC pour différentes distributions granulométriques (voir courbes granulométriques à la figure 6-3)	180
Tableau 6.2 : Relations entre le poids unitaire γ_d (kN/m ³) et l'indice des vides e pour les mesures aux démontages et aux essais normalisés.	184
Tableau 6.3 : Sommaires des mesures principales pour les essais de drainage E2	185
Tableau 6.4 : Taux d'infiltration calculé selon Green et Ampt 1911 (équation 2-18).....	185
Tableau 6.5 : Valeurs d'entrée d'air (ψ_a) et d'eau (ψ_r)	186

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Localisation géographique du site de la mine du Lac Tio (source : Google, 2012)	4
Figure 1.2 : Vue aérienne de la Mine du Lac Tio (tiré de RTFT 2009).....	5
Figure 1.3 : Diverses approches permettant de déterminer les propriétés non saturées des matériaux granulaires (adaptée de Fredlund et al., 2012).	7
Figure 2.1 : Types de configuration géométriques des haldes à stériles en fonction de la topographie (adapté de McCarter, 1985; tirée de Aubertin et al., 2002)	10
Figure 2.2 : Coupe transversale conceptuelle d'une halde à stériles montrant la structure interne (Aubertin et al., 2005, 2008; Anterrieu et al., 2010).....	13
Figure 2.3 : Systèmes hydrologique et hydrogéologique d'une halde en terrain plat ou en sommet de montagne (adapté de Morin et al.; 1991, tiré de Aubertin et al., 2002).	14
Figure 2.4 : Montage utilisé pour réaliser les essais de perméabilité et pour obtenir la courbe de rétention d'eau en condition de drainage (Peregoedova, 2012).....	18
Figure 2.5 : Charte combinée pour l'indice d'arrondi (roundness index) et la sphéricité (sphericity) des sables (tirée de Krumblein et Sloss, 1963).....	21
Figure 2.6 : Courbes de rétention d'eau (a) et fonctions de perméabilité (b) idéalisées pour un sable et un silt (tiré d'Aubertin et al., 2015)	29
Figure 2.7 : Exemple de CRE mesurées et prédites pour des roches stériles à l'aide des modèles MK et MK _S (tiré de Peregoedova, 2012).	33
Figure 2.8 : Profil de la teneur en eau volumique selon le modèle de Green et Ampt (1911) (tiré de Lessard, 2011)	35
Figure 2.9 : Configuration générale d'un système de recouvrement multicouches (tiré de : Aubertin et al., 2002, 2015)	37
Figure 2.10 : Simulation avec des couches de sable horizontales dans une halde en gravier; à gauche, la teneur en eau après un (1) an; à droite après trois (3) ans; simulé avec HYDRUS2D (tiré de Fala et al., 2003).....	42

Figure 2.11 : Simulation avec des couches de sable subhorizontales inclinées à 5% dans une halde en gravier : à gauche la teneur en eau après un (1) an; à droite après trois (3) ans; simulé avec HYDRUS2D (tiré de Fala et al., 2003).....	42
Figure 2.12 : Haldes à stériles selon le modèle stochastique avec corrélation horizontale simulé avec HYDRUS2D (tirée de Fala et al., 2011).....	44
Figure 2.13 : Sondes diélectriques a) Echo Ec-5, b) GS-3 et c) 5TM (tiré de www.decagon.com)	53
Figure 2.14 : Capteur de pression Diver DI 601 utilisée dans la colonne d'eau de 10 m (Schlumberger Water Services)	54
Figure 2.15 : Exemple de tensiomètre OMEGA PX240.....	55
Figure 3.1 : Localisation de la mine du Lac Tio située à 43 km au nord de la ville de Havre-Saint-Pierre dans la région de la Côte-Nord du Québec (tiré de Google Earth 2015-04-21)	58
Figure 3.2 : Distribution granulométrique représentative de l'échantillon de roches stériles. .	63
Figure 3.3 : Séparateur de matériaux type (source : http://www.humboldtmg.com/)	64
Figure 3.4 : Résultat de l'évaluation visuelle des indices d'arrondi et de sphéricité de la roche stérile tamisée (selon l'approche de Krumbein et al. 1963).	67
Figure 3.5 : Résultat des essais de compactage Proctor standard et modifié (ASTM D698 et ASTM D1557, méthode B), sur les roches stériles.....	73
Figure 3.6 : Conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) en fonction de l'indice des vides (e)	75
Figure 3.7 : Prédiction de la courbe de rétention d'eau pour les roches stériles tamisées selon le modèle Kovács modifié (MK).	77
Figure 3.8 : Prédiction de la courbe de rétention d'eau pour les roches stériles tamisées utilisées pour ce projet selon le modèle Kovács modifié pour stériles (MK _s) de Peregoedova (2012).	78
Figure 4.1 : Schéma des installations pour l'essai de perméabilité à charge constante sur les roches stériles placées dans une colonne de 1,2 m de hauteur.....	81

Figure 4.2 : Photographie de la cuve utilisée pour les essais des montages M1, M2 et M3.....	83
Figure 4.3 : Quartage et homogénéisation des roches stériles selon la procédure ASTM C702-Méthode B.....	89
Figure 4.4 : Représentation schématique du montage dans la cuve (aucune échelle). Chaque couche a une épaisseur d'environ 10 cm.	91
Figure 4.5 : Disque et instrument de guidage utilisé pour contrôler la position et la hauteur de tombée du disque lors du compactage des roches stériles dans la cuve.	92
Figure 4.6 : Schéma du positionnement du disque lors du compactage (inspiré de la procédure ASTM D698).	93
Figure 4.7 : Diagramme en croix (axes X et Y) utilisé pour les mesures de la hauteur du matériau à divers endroits dans la cuve.	93
Figure 4.8 : Photo qui montre la méthode pour mesurer la hauteur du matériau dans la cuve.	94
Figure 4.9 : Emplacement des sondes diélectriques pour chacune des couches de matériau ...	95
Figure 4.10 : Vue à partir du dessus de la cuve pendant l'essai de drainage.....	96
Figure 4.11 : Équipements utilisés pour les essais d'infiltration à charge constante dans la cuve. Schéma et photo.	99
Figure 4.12 : Boîtiers d'enregistrement des données des sondes diélectriques (Decagon Em50).	100
Figure 4.13 : Colonnes remplies d'eau distillée désaérée sous vide.....	101
Figure 4.14 : Placement d'une sonde à pression dans le baril d'exfiltration en incluant une couverture d'eau.....	102
Figure 4.15 : Tuyau fournissant l'eau provenant de la colonne jusqu'au centre de l'infiltromètre (a) en évitant le déplacement des particules en surface du matériau. Vue de côté du réseau d'écoulement schématisé lors des essais d'infiltration (b).....	103
Figure 4.16 : Représentation de l'installation des équipements pour effectuer les essais d'infiltration à charge variable.....	105

Figure 4.17 : Décantation des sédiments provenant de l'exfiltration dans les chaudières	107
Figure 5.1 : Schéma des essais de drainage en colonne.....	111
Figure 5.2 : Configuration du bas de la colonne sous le matériau et schématisation et points de sortie de l'eau. Sortie #1 utilisée pour les essais de perméabilité; sortie #2 utilisée pour les essais de drainage.....	112
Figure 5.3 : Schéma du tube de sortie en 'Z' avec un double coude utilisé pour l'essai de drainage en colonne.	113
Figure 5.4 : Profondeur de la position de l'eau libre créée par le tube de sortie pour chacune des colonnes.	114
Figure 5.5 : Porosité n et poids volumique sec γ_d des roches stériles dans les colonnes A et B au montage et au démontage (en fonction de la profondeur).....	115
Figure 5.6 : Degré de saturation S_r et teneur en eau volumique θ_v des roches stériles dans les colonnes A et B au montage et au démontage, en fonction de la profondeur.....	116
Figure 5.7 : Schéma de la localisation des mesures de pression (voir détail au tableau 5-1).	117
Figure 5.8 : Pression mesurée dans la colonne pendant les essais de perméabilité réalisés dans la colonne A.	120
Figure 5.9 : Principales mesures pour l'essai de perméabilité #3 mené à charge variable et constante (de 146,5 cm) pour la colonne A : a) Volume d'eau de drainage à la sortie en fonction du temps, b) Valeur de la conductivité hydraulique corrigée à 20°C, c) Pression mesurée par les tensiomètres à différentes hauteurs en fonction du temps.	121
Figure 5.10 : Principales mesures pour l'essai de perméabilité #4 mené à charge variable et charge constante (de 147,1 cm) pour la colonne A: a) Volume d'eau de drainage à la sortie en fonction du temps, b) Valeur de la conductivité hydraulique corrigée à 20°C, c) Pression mesurée par les tensiomètres à différentes hauteurs en fonction du temps.....	122
Figure 5.11 : Principales mesures pour l'essai de perméabilité #5 mené à charge variable et charge constante (de 147,1 cm) pour la colonne A: a) Volume d'eau de drainage à la	

sortie en fonction du temps, b) Valeur de la conductivité hydraulique corrigée à 20°C, c) Pression mesurée par les tensiomètres à différentes hauteurs en fonction du temps..... 123

Figure 5.12 : Essai de drainage colonne A : a) Volume cumulatif d'eau drainée, b) Débit de drainage mesuré en fonction du temps, c) Mesures des tensiomètres durant tout l'essai, d) Mesures des tensiomètres les 10 premières heures, e) Profil de la charge (+) et de la succion (-) mesurée à plusieurs temps sur la profondeur de la colonne. 126

Figure 5.13 : Essai de drainage colonne B: a) Volume cumulatif d'eau drainée, b) Débit de drainage mesuré en fonction du temps, c) Mesures des tensiomètres durant tout l'essai, d) Mesures des tensiomètres les 10 premières heures, e) Profil de la succion mesurée à plusieurs temps sur la profondeur de la colonne..... 127

Figure 5.14 : Mesures des teneurs en eau volumique θ_w et valeurs de la succion d'entrée d'air [$AEV \equiv \psi_a$] et résiduelle [$WEV \equiv \psi_r$] des roches stériles pour chacune des colonnes A et B..... 129

Figure 5.15 : Courbes de rétention d'eau et fonctions de conductivité hydraulique obtenues avec le modèle van Genuchten-Mualem pour les essais de drainage des colonnes A et B à (l'aide du code RETC van Genuchten et al., 1991). 131

Figure 5.16 : Distribution granulométrique des roches stériles lors du démontage des colonnes. 132

Figure 5.17 : Photo des principaux éléments constituant les essais de drainage en cuve 134

Figure 5.18 : Résultats des mesures du débit et volume d'eau d'infiltration enregistrés selon trois méthodes pendant l'essai M1E1. 142

Figure 5.19 : Charge mesurée pendant l'essai de drainage M1E2 en surface (infiltration) et à la sortie (exfiltration) : les valeurs converties selon le diamètre du récipient. Infiltration : axe vertical gauche, exfiltration : axe vertical droit..... 145

Figure 5.20 : Teneur en eau volumique mesurée en fonction du temps pendant l'essai M1E2 : pour la durée totale de l'essai, a) en surface, c) au milieu et e) au bas; pour les 4 premières heures de l'essai, b) en surface, d) au milieu et f) au bas..... 147

Figure 5.21 : Distributions granulométriques des roches stériles avant les essais et suite aux démontages M1 et M3.	149
Figure 5.22 : Charge mesurée pendant l'essai de drainage M2E2 en surface (infiltration) et à la sortie (exfiltration) : les valeurs converties selon le diamètre du récipient. Infiltration : axe vertical gauche, exfiltration : axe vertical droit.....	154
Figure 5.23 : Teneur en eau volumique en fonction du temps pendant l'essai M2E2: pendant la durée totale de l'essai pour a) en surface, c) au milieu et e) au bas, ainsi que pour les 4 premières heures de l'essai pour b) en surface, d) au milieu et f) au bas.	155
Figure 5.24 : Distributions granulométriques des roches stériles suite aux essais du démontage M2.	157
Figure 5.25 : Charge moyenne pendant l'essai de drainage M3E2 en surface (infiltration) et à la sortie (exfiltration) : les valeurs converties selon le diamètre du récipient. Infiltration : axe vertical gauche, exfiltration : axe vertical droit.....	161
Figure 5.26 : Teneur en eau volumique en fonction du temps pendant l'essai M3E2 : pendant la durée totale de l'essai pour a) en surface, c) au milieu et e) au bas, ainsi que pour les 4 premières heures de l'essai pour b) en surface, d) au milieu et f) au bas.	163
Figure 5.27 : Charge hydraulique appliquée à la surface dans l'infiltromètre pour l'essai M3E3 en fonction du temps. Résultats obtenus par deux capteurs de pression distincts (B9016 et B9107).....	165
Figure 5.28 : Charge hydraulique appliquée à la surface dans l'infiltromètre pour l'essai M3E4 en fonction du temps. Résultats obtenus par quatre capteurs de pression distincts (B9114, G3178, B9021 et B9107).	165
Figure 5.29 : Charge d'infiltration et d'exfiltration cumulative de l'eau en fonction du temps pour l'essai M3E3.	167
Figure 5.30 : Charge d'infiltration et d'exfiltration cumulative de l'eau en fonction du temps pour l'essai M3E4.	167
Figure 5.31 : Teneur en eau volumique mesurée en fonction du temps pendant les essais M3E3 (colonne de gauche) et M3E4 (colonne de droite).	169

Figure 5.32 : Distribution granulométrique des roches stériles suite aux essais du démontage M3.	173
Figure 6.1 : Temps d'arrivée de l'eau de drainage au point d'exfiltration pour chacun des essais d'infiltration selon l'énergie de compactage (kJ/m^3) appliqué au montage de la cuve sur les roches stériles.	177
Figure 6.2 : Quantité cumulative de sédiments fins récupérés dans l'eau de drainage lors de chacun des essais pour chaque montage dans la cuve qui représente 0,09% de la masse totale de matériau pour les trois montages combinés.	178
Figure 6.3 : Distribution granulométrique des roches stériles initiale et suite au démontage de chacun des essais en cuve.	179
Figure 6.4 : Teneur en eau volumique θ_v au démontage en fonction de l'effort de compactage lors du montage de la cuve; de la densité sèche ρ_d et la porosité n au démontage sont aussi montrée.	181
Figure 6.5 : Valeurs de la teneur en eau volumique obtenues par les mesures directes (selon w) et avec les sondes diélectriques Decagon lors du démontage de chacune des cuves (M1, M2 et M3). La marge d'erreur (la précision) des mesures est indiquée à l'aide des barres.	182
Figure 6-6 : Relation entre le poids unitaire sec γ_d et l'indice des vides e au démontage des essais M1, M2 et M3.	184
Figure 6.7 : Comparaison des CRE mesurées et prédites	187
Figure 6.8 : Courbes de rétention d'eau utilisées pour la modélisation numérique des roches stériles.	189
Figure 6.9 : Fonction de la conductivité hydraulique appliquée aux roches stériles dans les modèles numériques.	190
Figure 6.10 : Maillage utilisé pour le modèle représentant les essais en cuve (axisymétrique), taille maximale des éléments de 1 cm.	192

- Figure 6.11 : Valeurs des TEV en fonction du temps obtenues des modèles numériques (colonne gauche) et des essais en cuve (colonne droite) au laboratoire pour le montage M1E2 à divers endroits (localisation des sondes selon section 5.2). 194
- Figure 6.12 : Valeurs des TEV en fonction du temps obtenues des modèles numériques (colonne gauche) et les essais en cuve (colonne droite) au laboratoire pour le montage M2E2 à divers endroits (localisation des sondes selon section 5.2). 195
- Figure 6.13 : Valeurs des TEV en fonction du temps obtenues des modèles numériques (colonne gauche) et les essais en cuve (colonne droite) au laboratoire pour le montage M3E2 à divers endroits (localisation des sondes selon section 5.2). 196
- Figure 6.14 : Débits de sorite au point d'exfiltration en fonction du temps pour les montages M1E2, M2E2 et M3E2 obtenues à partir du modèle numérique et des essais en cuve. . 198

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Δh	changement de charge [L]
2D	deux dimensions
3D	trois dimensions
A	aire du cylindre [L ²]
a	aire du réservoir d'eau [L ²]
a_c	coefficient d'adhésion, [-]
AEV	air entry value (pression d'entrée d'air)
ASTM	American Society of Testing and Materials
a_v, m_v, n_v	paramètres du modèle de van Genuchten (1980)
B	Nombre de coups (tombés) par couche de matériau [-]
b_1	paramètre pour les grains grossiers pour calculer $h_{co,G}$ [L ²]
BC	modèles Brooks and Corey
C	facteur de tortuosité, [-]
C_c	coefficient de courbure, [-]
C_d	paramètre de matériau pour le diamètre effectif, [-]
C_e	paramètre de matériau pour l'indice des vides, [-]
CEBC	couverture à effet de barrière capillaire
C_G	constante pour sol granulaire (0,1 lorsque matériau sphérique) [-]
C_R	degré de compactage, [-]
CRE	courbe de rétention d'eau
CRNSG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
C_U	coefficient d'uniformité, [-]
C_ψ	facteur de correction, [-]
D	hauteur de tombé du poids (cm, [L])
D	particules de diamètre plus grand que d , [L]

d	particules de diamètre plus petit que D , [L]
D	Diamètre de l'échantillon de matériau dans le perméamètre [L]
D_{10}	diamètre des particules passant 10% de la totalité de l'échantillon [L]
D_{30}	diamètre des particules passant 30% de la totalité de l'échantillon [L]
D_{60}	diamètre des particules passant 60% de la totalité de l'échantillon [L]
DDL	limite d'écoulement en bas de pente (down dip limit)
d_{eq}	diamètre équivalent des pores, [L]
D_H	diamètre équivalent des grains pour un échantillon hétérogène, [L]
D_{H_CL}	Diamètre équivalent calculé à partir de la surface spécifique selon la méthode MKs, [L]
DMA	drainage minier acide
D_{min}	diamètre minimal mesuré [L]
DNC	drainage neutre contaminé
D_r	densité relative des grains, [-]
DRX	diffraction des rayons X
e	indice des vides, [-]
E	Énergie appliquée lors du compactage [F-L/L ³]
ECH ₂ O	sondes diélectriques Decagon
e_{-moy}	indice des vides moyen
Fe ₂ O ₃	hématite-ilménite
FeTiO ₃	hémio-ilménite
fs	fraction de sulfures
g	accélération gravitationnelle [L/T ²]
γ_{d-max}	poids unitaire sec maximal, [F/L ³]
GPR	Géoradar (Ground penetrating radar)
GVL	rejet graveleux

γ_w	poids unitaire de l'eau, [F/L ³]
h	charge hydraulique, [L]
H ₂ O	eau
h_c	montée capillaire équivalente, [L]
$h_{co_adhésion}$	Remontée capillaire équivalente pour la détermination de la saturation d'adhésion, [L]
h_{co}	remontée capillaire calculé selon le modèle MK, [L]
h_{coG}	montée capillaire équivalente pour matériaux granulaire, [L]
HDS	capteur de dissipation thermique (Heat dissipation sensor)
H_f	charge finale, [L]
H_i	charge initiale, [L]
H_{max}	charge maximum appliquée, [L]
H_{moy}	charge moyenne appliquée, [L]
H_n	charge au temps n, [L]
i	Gradient hydraulique, [-]
ICOLD	International Commission on Large Dams
i_{max}	gradient hydraulique maximale, [-]
i_{moy}	gradient hydraulique moyen, [-]
IRME	Institut de Recherche en Mines et Environnement
K	perméabilité intrinsèque du sol, [L ²]
$k(\theta_e)$	conductivité hydraulique dépendante de la teneur en eau effective saturée [LT ⁻¹]
k	conductivité hydraulique du matériau, [L/T]
$K(S_e)$	fonction de la conductivité hydraulique non saturée, [L/T]
$k(u_w)$	conductivité hydraulique en fonction de la succion d'eau matricielle
k_{20}	conductivité hydraulique, converti pour température de l'eau à 20°C, [L/T]
KC	Kozeny-Carman

KCM	Kozeny-Carman modifié
k_s	conductivité hydraulique saturée, [LT^{-1}]
k_{sat}	conductivité hydraulique saturée, [L/T]
k_w	coefficient de perméabilité de l'eau, [L/T]
l	paramètres représentant le degré de connection entre les pores largage
L_c	distance entre les deux manomètres, [L]
L ou L_c	longueur du cylindre [L]
L_f	la longueur de l'échantillon [L]
L_s	nombre de couches de matériau [-]
γ_d	Poids unitaire sec [M/L^2T]
γ_w	Poids unitaire de l'eau [M/L^2T]
γ_{d-moy}	poids unitaire sec moyen, [F/L^3]
$\partial h_w / \partial y$	gradient de charge hydraulique dans la direction des y, désigné comme i_{wy} [-]
m	constante d'ajustement utilisée pour la description de la courbe de rétention d'eau selon le modèle de van Genuchten (1980), [-]
m	coefficient de porosité dans le modèle MK, [-]
M	Masse nette de l'échantillon compacté [M]
M_0	masse originale, [M]
M_a	masse du pycnomètre rempli d'eau distillée désaérée, [M]
M_b	masse du pycnomètre rempli d'eau et de matériau, [M]
MDDELCC	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, et de la Lutte contre les Changements Climatiques
M_e	masse du perméamètre rempli avec de l'eau désaérée, [M]
M_h	masse matériaux humide, [M]
MK	modified Kovacs
MK _s	modified Kovacs pour stériles

MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles
M_{md}	Masse du moule de compactage [M]
M_{ms}	masse du matériau humide, [M]
M_s	masse des grains solides, [M]
$M_{séd}$	masse sédiments transportés par eau à l'exfiltration, [M]
M_t	Masse du matériau humide dans le moule avec le moule [M]
M_{tot}	masse totale du perméamètre avec matériau, eau et air, [M]
n	constante d'ajustement utilisée pour la description de la courbe de rétention d'eau selon le modèle de van Genuchten (1980), [-]
n	porosité, [-]
n_{eff}	porosité effective, [-]
Ni	nickel
n_{-moy}	porosité moyenne, [-]
O ₂	oxygène
P_d	pourcentage des particules plus grandes que le diamètre d, [%]
P_D	pourcentage des particules plus petites que le diamètre D, [%]
P_{NOD}	pourcentage de particule de diamètre D, [%]
P_{NOd}	pourcentage de particule de diamètre d, [%]
Q	débit ou volume d'eau par unité de temps écoulé [L ³ /T]
q_e	débit de l'eau
RETC	logiciel RETention Curve
REMM	Règlement sur les Effluents des Mines de Métaux
R_T	Ratio de viscosité à la température absolue de 20°C
RTD	Reflectometry time domain
RTFT	Rio Tinto Fer et Titane
S	surface spécifique des solides, [L ² /M]

S_a	composante d'adhésion du degré de saturation, [-]
SARs	7 Plateforme de sol OU (synthetic aperture radar) OU diffusiomètre
SBL	rejet sableux fin homogène
S_c	composante de capillarité du degré de saturation, [-]
S_e	degré de saturation effectif ou teneur en eau volumique, [%]
S_m	aire de la surface spécifique par unité de masse de solide, [L ² /M]
$S_{\text{-moy}}$	degré de saturation moyen, [%]
S_o	degré de saturation à teneur en eau résiduelle, [%]
S_r	degré de saturation, [%]
S_s	surface spécifique des solides, [L ² /M]
t	temps écoulé, [T]
TDR	Réflectométrie à dimension temporelle ('Time Domain Reflectometry')
TDT	Time domain transmission
t_n	temps écoulé n, [T]
u_w	pression d'eau, [L]
V	volume, [L ³]
V_{Darcy}	vitesse de Darcy, [L/T]
vG	modèles van Genuchten
V_m	volume de la couche, [L ³]
V_s	volume des grains solides, [L ³]
V_T	volume des couches, [L ³]
V_v	volume des vides, [L ³]
v_w	vitesse de l'eau, [L/T]
V_w	volume eau, [L ³]
w	teneur en eau massique, [%]
$w_{\text{-moy}}$	teneur en eau massique moyenne, [%]

WEV	water entry value (pression d'entrée d'eau)
W_h	poids du disque (kg), [M]
α	facteur de forme, [-]
β_w	angle de contact, [-]
θ	teneur en eau volumique, [L^3/L^3]
$\theta(u_w)$	teneur en eau volumique en fonction de la succion d'eau matricielle, [L^3/L^3]
θ_e	teneur en eau effective, [L^3/L^3]
θ_m	teneur en eau massique, [%]
$\theta_{\text{-moy}}$	teneur en eau volumique moyenne, [L^3/L^3]
θ_r	teneur en eau résiduelle, [L^3/L^3]
θ_s	teneur en eau saturée, [L^3/L^3]
θ_v	teneur en eau volumique, [L^3/L^3]
μ_w	viscosité dynamique de l'eau ($\approx 10^{-3}$ Pa·s à 20 C°), [PT]
μ_w	viscosité dynamique de l'eau ($\approx 10^{-3}$ Pa·s à 20 C°), [PT]
ν	viscosité dynamique, cP (1 cP = 10^{-3} Pa·s), [PT]
ρ	densité, [M/L ³]
ρ_d	masse volumique sèche, [M/L ³]
ρ_s	masse volumique des grains solides, [M/L ³]
ρ_w	masse volumique de l'eau, [M/L ³]
σ_w	tension de l'eau en surface, [F/L]
Ψ	succion, [L]
Ψ_0	succion sèche, [L]
Ψ_a	succion d'air, [L]
Ψ_{aMK}	succion à la valeur d'entrée d'air (VEA) déterminée avec le modèle MK, [L]
Ψ_n	paramètre de normalisation, [L]
Ψ_r	succion résiduelle, [L]

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Résultats des essais en cuve.....	213
Annexe B – Résultats des essais en colonnes	253
Annexe C – Calibration des instruments	317
Annexe D – Protocoles détaillés des essais	330
Annexe E – Résultats de la modélisation numérique.....	359
Annexe F – Résultats des mesures au DRX sur les sédiments	390
Annexe G – Résultats détaillés des essais standards	399
Annexe H – résultats des calculs de la rondeté et de la sphéricité.....	414
Annexe I – Résultats des essais en petites colonnes	418
Annexe J – Résultats des essais de perméabilité	428

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Généralités

La gestion des rejets miniers reste encore aujourd'hui un enjeu important dans l'industrie minière. La gestion durable des rejets miniers débute avec l'identification des éléments du site minier qui peuvent avoir un impact sur l'environnement local et régional, à court et à long terme (Morin et al. 1991). La gestion durable des rejets miniers requiert une appréciation des éléments physiques, chimiques et biologiques spécifiques à chacun des sites (Morin et al. 1991).

Les roches stériles sont composées de roches minées, n'ayant pas de valeur économique viable pour en justifier la transformation. Elles sont généralement placées dans des empilements de surface appelés haldes. Ces haldes à stériles deviennent une partie intégrante du système hydrologique régional (Morin et al. 1991). La migration de l'eau à travers les rejets miniers est la principale source de contaminants (Morin et al. 1991). Dans le cas des haldes à stériles, la production de drainage minier acide [DMA] et de drainage minier neutre contaminé [DNC] figurent par les les principaux enjeux environnementaux (Bussière et al., 2005, 2011; Aubertin et al. 2013).

Les roches stériles représentent en moyenne 10 à 15% de toutes les roches dures extraites des opérations minières souterraines et environ 65% pour les opérations minières à ciel ouvert (Aubertin et al., 2002). Les mines à ciel ouvert produisent usuellement des haldes à stériles beaucoup plus grandes que les mines souterraines, car beaucoup plus de roches doivent être extraites de celles-ci afin d'atteindre la zone géologique minéralisée (Aubertin et al., 2008). Les roches stériles ne contiennent pas suffisamment de minerai pour être économiquement exploitées. La tendance qui vise un développement minier basé sur des opérations à ciel ouvert à large tonnage et à faible teneur en minerai mène à une augmentation substantielle de la quantité de roches stériles produites par l'industrie (Aubertin et al., 2015).

Chaque halde à stériles a des caractéristiques particulières. Il est important d'avoir une compréhension approfondie des particularités de chaque halde avant d'entreprendre des travaux de restauration (Morin et al. 1991). Pour améliorer les méthodes de gestion des haldes à stériles, il est important d'observer et de comprendre scientifiquement le comportement

hydrogéologique des haldes sous différentes configurations (Aubertin et al., 2002, 2005, 2008; Bussière et al., 2011).

Règlementation

La législation fédérale (Règlement sur les Effluents des Mines de Métaux [REMM]) et provinciale (Directive 019 du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, et de la Lutte contre les Changements Climatiques [MDDELCC]) et le guide et modalités de préparation du plan de restauration (Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles [MENR]), sont quelques-unes des règles qui régissent la gestion des rejets de l'industrie minière au Québec. Elles visent les aspects environnementaux, géotechniques et hydrogéologiques des projets miniers. Au Québec, la Directive 019 sur l'industrie minière donne les orientations nécessaires pour satisfaire les attentes du MDDELCC, qui est l'organisme qui émet les certificats d'autorisation. Cette directive traite des exigences relatives aux eaux de surface, à la protection de l'eau souterraine, à la gestion des rejets miniers, à la fermeture temporaire et définitive des parcs à résidus, et au suivi des eaux de surface et souterraines post fermeture.

Selon le rapport de l'état du Québec (Institut du nouveau monde, 2010), le Québec comptait 30 mines en exploitation. Ce rapport stipule que seulement 40% des ressources serait connues et que le sous-sol québécois reste sous-exploité. On peut s'attendre à ce que l'exploitation minière continue pendant plusieurs années sur ce vaste territoire.

Les haldes à stériles ont longtemps été, et encore parfois aujourd'hui, des structures qui n'ont pas retenu beaucoup d'intérêt. Les vingt dernières années ont été marquées par une augmentation des travaux liés aux haldes à stériles. Cette augmentation est en partie due aux législations et à la conscientisation face aux impacts environnementaux. En particulier, la Chaire industrielle CRNSG¹ Polytechnique-UQAT sur l'environnement et la gestion des rejets miniers a menée plusieurs études sur les haldes à stériles (entre 2001 et 2012). Depuis 2013,

¹ Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada

l'Institut de Recherche en Mines et Environnement (IRME) poursuit des études sur le sujet. Quelques-unes de ces études seront décrits dans la revue de littérature afin de faire un bref survol des outils disponibles pour caractériser et comprendre le comportement hydrogéologique des haldes à stériles.

Problématique

La mine du Lac Tio appartenant à la compagnie minière Rio Tinto Fer et Titane [RTFT] fait face à un problème de DNC, car la concentration en nickel (Ni) dans l'eau peut parfois dépasser les normes environnementales en vigueur. Plusieurs projets de l'IRME sont en relation avec ce site et ont pour objectif ultime de déterminer une configuration optimale des haldes à stériles pour contrôler et diminuer la génération du DNC à long terme et dans un optique de restauration du site pour la fermeture. La méthode de contrôle évaluée par le projet en cours est d'adopter la méthode de construction des haldes à stériles et de placer un recouvrement ingénieré, qui consiste à ajouter des couches de matériau compactées, minimisant l'infiltration profonde de l'eau à travers la halde (Aubertin et al., 2013; Bussière et al., 2015).

La mine du Lac Tio est située à 43 km au nord-est de la ville d'Havre-St-Pierre, sur la Côte-Nord, au Québec. La figure 1.1 montre la localisation géographique de la mine à partir d'une image satellite éloignée de la région de la Côte-Nord.

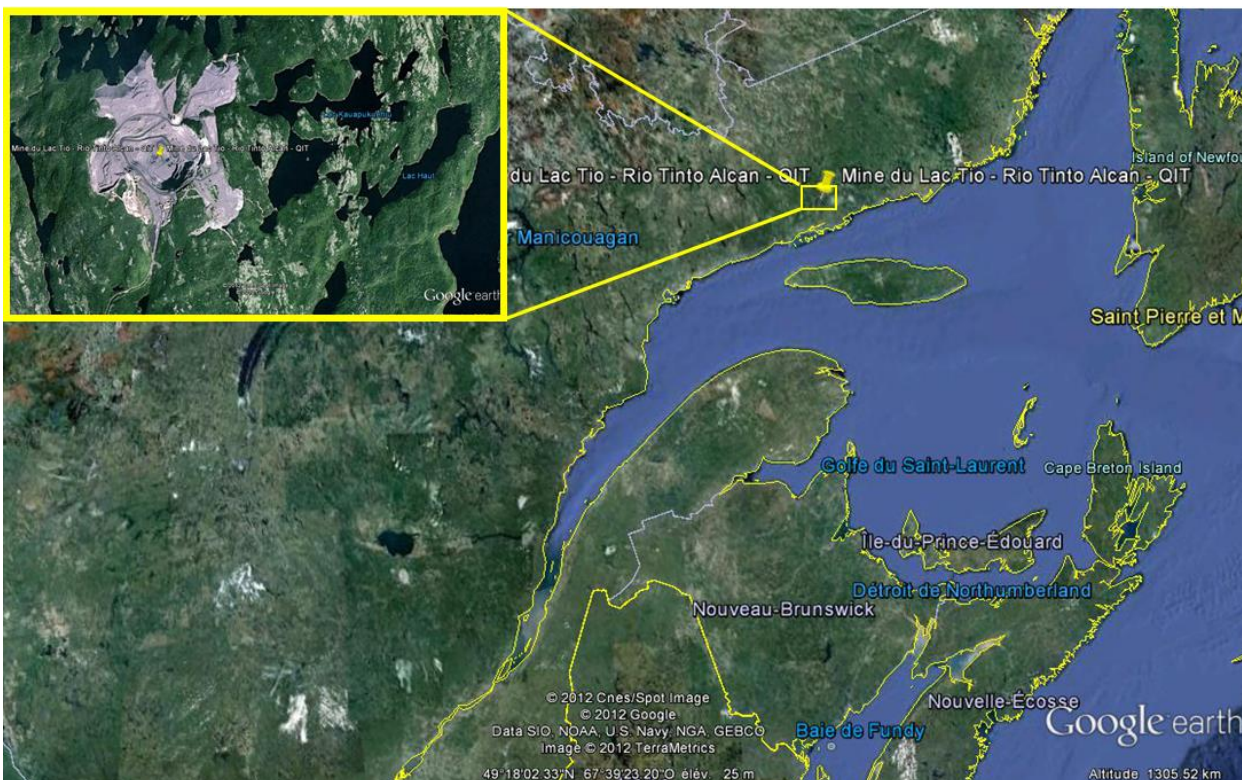


Figure 1.1 : Localisation géographique du site de la mine du Lac Tio (source : Google, 2012)

La mine du Lac Tio est une mine à ciel ouvert qui exploite un gisement d'hématite-ilménite et hémio-ilménite (Fe_2O_3 et FeTiO_3 , respectivement). Il est le plus grand gisement de ce type au monde. La mine est en exploitation depuis 1950 et présente un potentiel d'exploitation pour les quarante (40) années à venir. La mine exploite deux (2) fosses, nommées Tio et Nord-Ouest, cette dernière étant plus récente et plus petite. Les stériles sont empilés sur quatre (4) haldes, nommées Petit-Pas (nord), Léo (nord-est), Puyjalon (sud-est) et McCloskey (halde secondaire située entre les deux fosses). Les roches stériles tamisées caractérisées dans ce mémoire proviennent de la halde Petit-Pas située au nord du site.



Figure 1.2 : Vue aérienne de la Mine du Lac Tio (tiré de RTFT 2009)

Plusieurs travaux ont été menés sur les haldes à stériles du site incluant une caractérisation géochimique (Plante et al., 2011), la caractérisation hydrogéologique des matériaux de surface sur le terrain et au laboratoire (Gamache-Rochette, 2004; Hernandez, 2008; Pépin, 2009; Lessard, 2011; Peregoedova, 2012), les modélisations hydrogéologiques (Fala et al., 2003, 2006, 2008, 2011; Dawood et al., 2012, 2014), les modélisations géotechniques (Maknoon, 2016, thèse à venir) et l'évaluation de la structure interne à l'aide des méthodes de géophysique sur le terrain (Intissar, 2009; Anterrieu et al., 2010; Dawood et al., 2011). Plusieurs projets sont en cours à l'IRME sur ce site, notamment la construction et le suivi d'une halde à stériles expérimentale (Medina, 2017 thèse à venir). Le projet de l'équipe de recherche de l'IRME vise à développer un mode de gestion des stériles qui limitera la génération de drainage contaminé en contrôlant les infiltrations d'eau.

Projet

Ce projet consiste à caractériser les propriétés physiques et hydrogéologiques des roches stériles tamisées avec une granulométrie étalée, pour diverses densités (i.e. degrés de compactage). Les résultats obtenus pourraient être utilisés pour faire la planification d'essais de terrain et la simulation numériques du comportement des haldes qui incluent des couches de ce type.

L'objectif principal du projet est d'aider à mieux comprendre et analyser les processus d'écoulement de l'eau à travers une couche de roches stériles tamisées et compactées. Les connaissances acquises pourraient permettre de mieux contrôler la percolation dans les haldes et de favoriser l'écoulement vers des zones moins propices au transport de contaminants (Aubertin et al., 2008, 2013). Les objectifs spécifiques du projet sont :

- Caractériser les roches stériles compactées à partir d'essais au laboratoire.
- Élaborer une procédure qui permettra d'obtenir une caractérisation hydrogéotechnique réaliste des roches stériles tamisées.
- Déterminer les instruments disponibles commercialement qui pourront être utilisées pour étudier le comportement hydrogéologique des roches stériles compactées lors d'essais d'infiltration dans un modèle physique.
- Analyser les résultats obtenus avec les essais en laboratoire et les comparer avec les résultats anticipés selon des modèles prédictifs et des simulations numériques.

La figure 1.3, tirée de Fredlund et al., (2012), présente plusieurs approches qui permettent de déterminer les propriétés non saturées des matériaux granulaires. Pour ce projet de recherche, trois des quatre approches suggérées ont été appliquées, soient les trois premières méthodes (à partir de la gauche) identifiées dans cette figure.

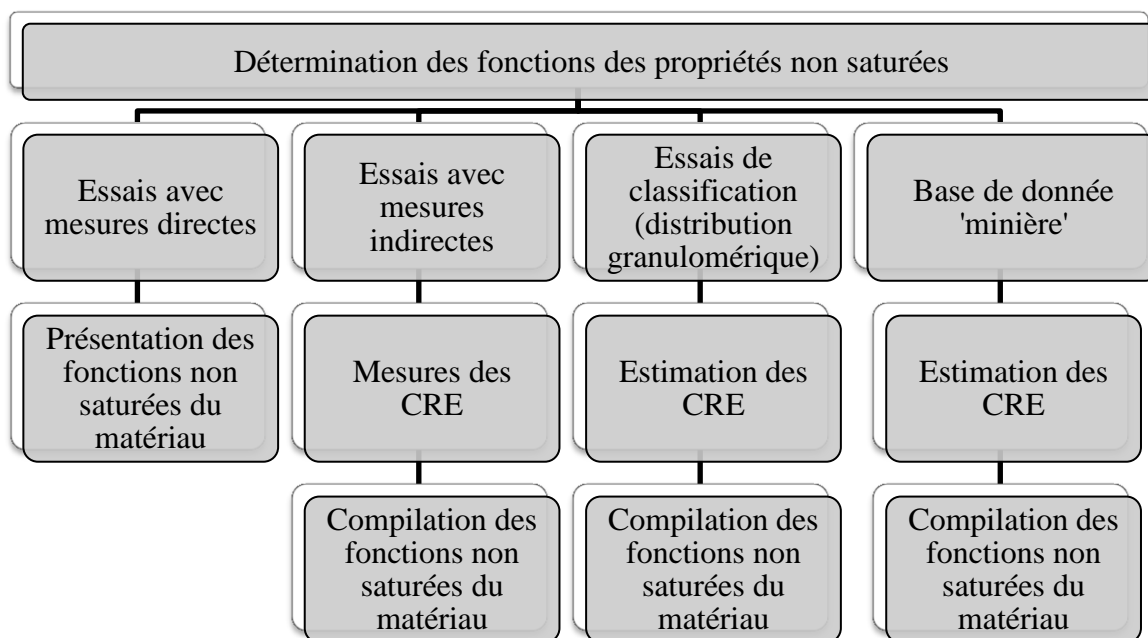


Figure 1.3 : Diverses approches permettant de déterminer les propriétés non saturées des matériaux granulaires (adaptée de Fredlund et al., 2012).

La caractérisation de base du matériau (et sa classification) a été faite à l'aide de plusieurs essais normalisés incluant la distribution granulométrique, la teneur en eau massique, la densité des grains, la porosité, et la densité maximale Proctor standard et modifié, etc. (voir chapitres 3 et 4, et annexes A et B). Des essais de drainage et d'infiltration en cuve et des essais de perméabilité et de drainage en colonne ont été utilisés pour évaluer les propriétés saturées et non saturées du matériau à différents degrés de compactage.

Le matériau a été testé en laboratoire dans une grande cuve cylindrique sous trois degrés de compactage (voir chapitres 4 et 5) pour évaluer l'impact de ce compactage sur les propriétés hydrogéotechniques du matériau. Les instruments de mesure ont été calibrés selon les besoins pour mesurer (indirectement) la teneur en eau volumique et la charge d'eau appliquée pendant les essais. Le matériau a aussi été évalué à l'aide d'essais en colonnes (voir chapitre 4 et 5) où les instruments mesurent la pression matricielle (voir annexe C).

Les données de laboratoire obtenues ont été analysées et comparées à des études antérieures sur le site et des modèles d'estimation/prédiction. L'estimation de la courbe de rétention d'eau

[CRE] s'est faite à l'aide des méthodes de prédiction Kovács modifié [MK], et Kovács modifié pour les stériles [MKs] (voir chapitre 3). Une estimation de la conductivité hydraulique a été faite avec les méthodes de prédiction Kozeny-Carman [KC] et Kozeny-Carman Modifié [KCM], présentées en détail plus loin. Les CRE lissée et la fonction de perméabilité ont été évaluées à l'aide du logiciel RETC (van Genuchten et al., 1991).

Les résultats de laboratoire obtenus ont été analysés et comparés à des modèles numériques (chapitre 6) construits pour évaluer le comportement et les caractéristiques des écoulements à travers les roches stériles en fonction du degré de compactage.

Contenu du mémoire

Ce mémoire de maîtrise comporte 7 chapitres. Suite à l'introduction, le deuxième chapitre présente une revue de littérature afin de fournir la base essentielle à la bonne compréhension du rapport. Une description du matériau ciblé pour les essais est présentée au chapitre 3 en fonction des caractéristiques typiques aux roches stériles, aux études antérieures menées sur ce matériau de la mine du Lac Tio, des essais standards (voir aussi annexe G et I) et des modèles prédictifs. Le protocole de laboratoire complet pour les essais en cuve est présenté au chapitre 4; il inclut aussi une brève description des essais en colonnes. Les résultats des essais en cuve et en colonnes sont présentés au chapitre 5; les résultats plus complets sont présentés aux annexes A, B, G, H, I et J. Le chapitre 6 décrit brièvement une modélisation numérique visant à évaluer les résultats obtenus, ainsi qu'une analyse de ces résultats. Le chapitre 7 présente la conclusion du mémoire et des recommandations pour des travaux futurs.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

L'objectif de ce chapitre est d'introduire l'information nécessaire à la compréhension des travaux, avec un accent sur les concepts et les particularités reliées aux roches stériles minières. La revue de littérature présente les principales caractéristiques, les propriétés géotechniques de base, et les propriétés hydrogéologiques de roches stériles produite par les mines en roches dures. On examine aussi les conditions d'écoulement d'eau en milieu poreux à partir de la théorie jusqu'à l'application aux recouvrements des haldes à stériles. Les techniques d'instrumentation font aussi l'objet d'une brève description selon les instruments disponibles et utilisés au cours des essais au laboratoire.

2.1 Principales caractéristiques des haldes à stériles

Les roches stériles qui sont entreposées en surface sous forme d'empilements, que l'on appelle haldes à stériles, sont exposées aux conditions climatiques. Les haldes à stériles peuvent avoir des hauteurs de plusieurs dizaines de mètres et couvrir de grandes superficies, selon la topographie du site et le type d'exploitation minière. Si elles contiennent des minéraux réactifs, les conditions environnementales peuvent s'avérer favorables à leur oxydation et à la dissolution/solubilisation des éléments mobiles pour former un lixiviat contaminé (Fala, 2003; Aubertin et al., 2005). De nombreux processus physiques, chimiques et biologiques peuvent mener à la production de DMA ou DNC (Bussière et al., 2015). Pour mieux comprendre les processus qui peuvent mener à la production de ces lixiviats, il est utile de rappeler les méthodes de construction des haldes à stériles, et les impacts des structures internes et externes des haldes sur les écoulements.

2.1.1 Méthodes de construction

L'entreposage des roches stériles peut se faire de plusieurs façons, dépendamment de la topographie du site, de la machinerie utilisée pour la manutention et selon les caractéristiques physicochimiques des stériles. Historiquement, les haldes à stériles ont été placées le plus près

possible de la zone d'extraction minière afin de réduire les frais de transport. Cette méthode de gestion des roches stériles a l'inconvénient de ne pas favoriser une sélection optimale du site d'entreposage à l'endroit où les impacts environnementaux seraient les plus faibles.

La géométrie des haldes devrait être guidée par la stabilité chimique et physique à long terme puisque ce sont généralement des ouvrages permanents. Certaines configurations géométriques pour les principaux types de déposition sont présentées à la figure 2.1 en fonction de la topographie du site.

La structure interne des haldes à stériles influence le mouvement de l'eau et de l'air à travers les haldes et varie en fonction de la méthode de construction et de la topographie. Il est utile de revisiter les méthodes de construction les plus couramment utilisées puisque c'est la base déterminante de la structure interne finale.

L'ouvrage de référence sur l'environnement et la gestion des rejets miniers (Aubertin et al., 2002) décrit quatre méthodes de disposition des stériles. Seulement trois de ces méthodes sont décrites dans cette section, puisque la 4^e méthode n'est pas utilisée dans les mines en roches dures.

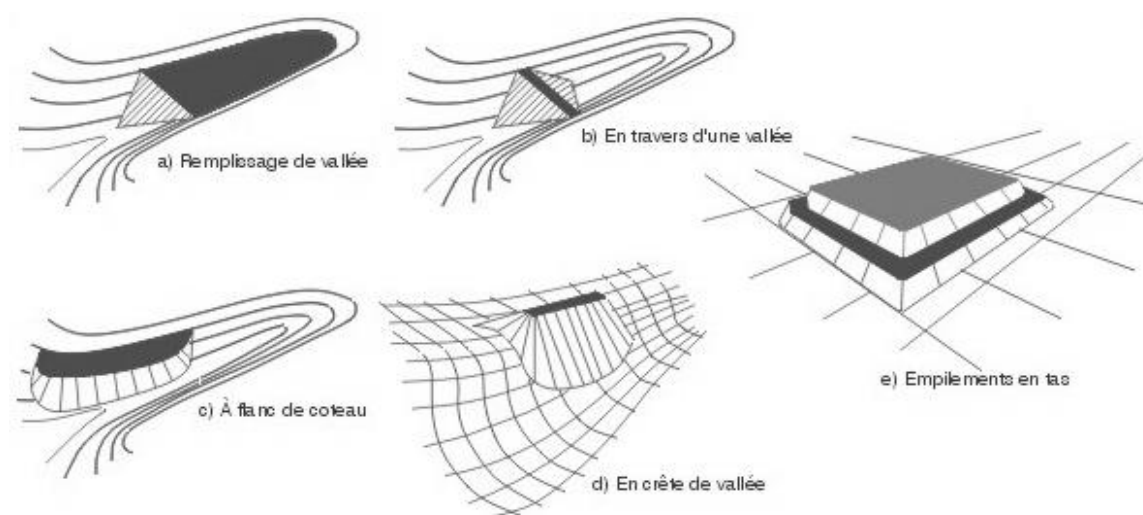


Figure 2.1 : Types de configuration géométriques des haldes à stériles en fonction de la topographie (adapté de McCarter, 1985; tirée de Aubertin et al., 2002)

La méthode I, appelée déversement à la benne (end-dumping), implique l'épandage des roches stériles avec des camions sur la crête de la halde. Avec cette méthode, trois (3) zones granulométriques peuvent être distinguées: une zone de particules fines en haut, une zone de particules grossières en bas (~75% des particules grossières se retrouveraient au bas de la pente) et une zone de granulométrie intermédiaire entre les deux (voir figure 2.1). La hauteur de la pente ne semble pas avoir d'effets sur cette distribution, même si en général la ségrégation est moins apparente lorsque la halde est petite.

La méthode II, appelée déversement avec épandage au butoir (push-dumping), consiste en l'épandage de tas de roches stériles près de la crête de la halde, qui sont ensuite poussés sur les flancs avec un bélier mécanique. Avec cette méthode, des stériles grossiers se retrouvent aussi à la base de la halde (~40% des particules grossières se retrouveront au bas de la pente), mais il y a moins de ségrégation près du haut de la halde (en comparaison avec la méthode I). Typiquement, on retrouve des couches subhorizontales de stériles fines et denses en surface, tel qu'illustré à la figure 2.1.

La méthode III, appelée déversement à la benne avec régilage (free-dumping), correspond à l'empilement de plusieurs petits monticules de stériles (environ 2 m de hauteur – dépendamment du type de camion utilisé pour le déversement) qui sont ensuite nivelés et parfois compactés. Avec cette méthode, la ségrégation est moins prononcée qu'avec les méthodes I et II. Cette méthode de construction est couramment utilisée pour amorcer la construction de la halde; les méthodes I ou II sont ensuite adoptées lorsque la halde est suffisamment élevée.

Les méthodes de construction I et II sont les plus courantes sur les terrains relativement plats. Ces méthodes créent deux (2) zones principales dans les haldes à stériles (Aubertin et al., 2008, Anterrieu et al., 2010) :

- un cœur (au centre de la halde) ayant une stratification subhorizontale et une alternance entre les couches denses et lâches en fonction de l'équipement utilisé pour l'épandage et la disposition, et;
- des flancs avec une ségrégation le long de la pente et une stratification inclinée à cause de l'avancement latéral du front du dépôt.

Il y a des avantages et des désavantages pour chacun des types de configuration présentée à la figure 2.1. Par exemple, un empilement en crête aura l'avantage de seulement recevoir l'eau des précipitations alors que le remplissage des vallées ou les dépôts en travers d'une vallée reçoivent un apport d'eau plus important provenant du bassin versant. Dans certain cas, l'eau propre provenant du bassin versant en amont de ces structures doit alors être déviée pour contourner les haldes et éviter d'être contaminée en traversant les roches stériles. Dans cette revue de littérature, seulement l'eau provenant des précipitations est considérée.

2.1.2 Structure interne

La distribution granulométrique des stériles dans une halde dépend de la méthode de construction utilisée. La figure 2-2 illustre un modèle conceptuel de la structure interne d'une halde à stériles. Les couches subhorizontales, de granulométries plus fines, d'épaisseurs et de densités variées, peuvent se développer selon les méthodes d'opération de l'équipement lourd sur la halde, et l'altération physique et chimique des particules près de la surface due aux conditions atmosphériques. Une ségrégation des stériles se fait généralement à la frontière externe des haldes (voir figure 2.2), car les grosses particules sont souvent transportées vers le bas de la pente alors que les roches fines restent plus haut. La frontière externe inclinée des haldes est généralement hétérogène et discontinue. La ségrégation est favorisée par les séquences de déversement des roches stériles pendant la construction (Fala et al., 2003; Anterrieu et al., 2010). Les caractéristiques particulières de la structure interne sont propres à chaque site et elles peuvent changer pendant la construction. La structure visible de l'extérieur n'est, par conséquent, pas nécessairement représentative de l'intérieur de la halde.

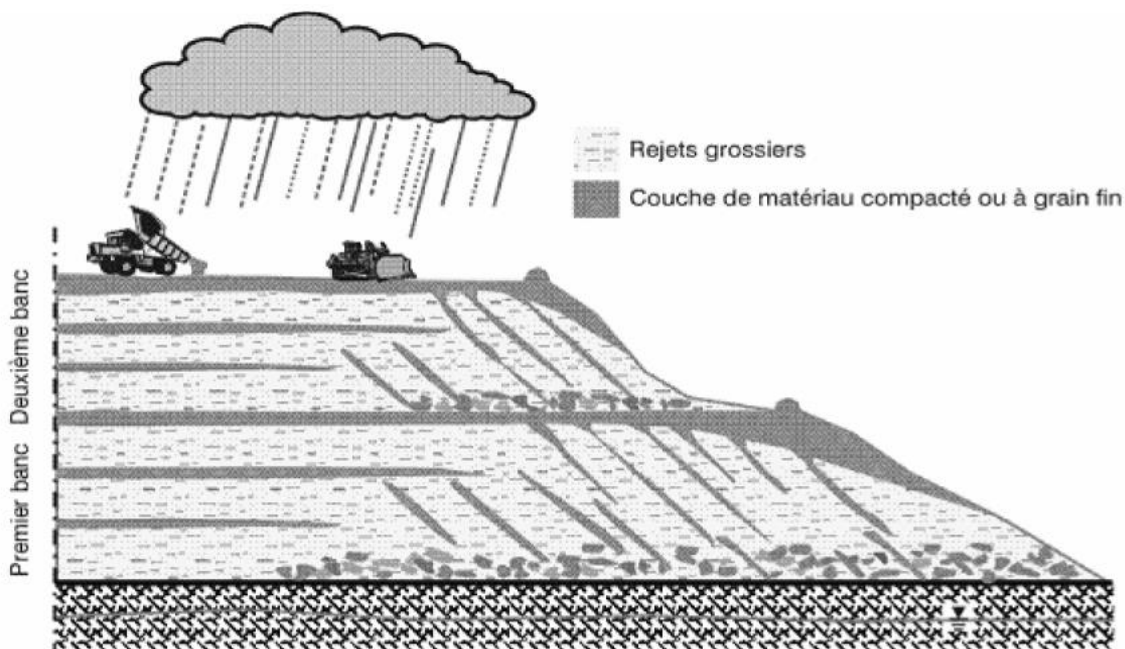


Figure 2.2 : Coupe transversale conceptuelle d'une halde à stériles montrant la structure interne (Aubertin et al., 2005, 2008; Anterrieu et al., 2010)

2.2 Méthode d'évaluation de l'écoulement de l'eau dans les roches stériles

Les conditions géochimiques qui se développent dans les haldes dépendent du comportement hydrogéologique de celles-ci, car l'eau (H_2O) et l'oxygène (O_2) participent aux réactions avec les minéraux réactifs.

Les précipitations sont la principale source de la recharge hydrogéologique d'une halde à stériles. Comme le démontre la figure 2.3, l'eau des précipitations qui tombe à la surface de la halde à stériles s'infiltre (et elle peut atteindre la surface piézométrique) ou ruisselle sur la surface. Les haldes à stériles répondent de façon transitoire, ce qui veut dire que les flux entrant et sortant peut varier avec le temps.

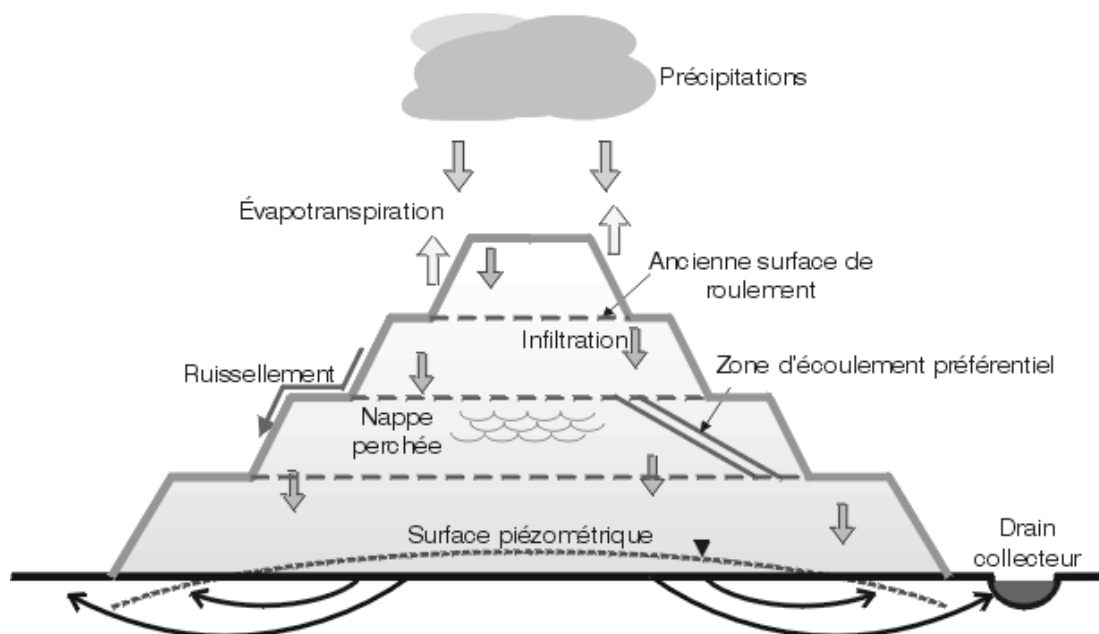


Figure 2.3 : Systèmes hydrologique et hydrogéologique d'une halde en terrain plat ou en sommet de montagne (adapté de Morin et al.; 1991, tiré de Aubertin et al., 2002).

Le bilan hydrique de la halde dépend de la topographie où elle est localisée, soit en terrain plat, en sommet de montagne, en creux de vallée ou à flanc de montagne (Morin et al., 1991; Aubertin et al., 2002). Les composantes du bilan hydrique peuvent être difficiles à estimer avec précision et il est souvent nécessaire de prendre des mesures *in situ* pour déterminer approximativement les valeurs réelles (Aubertin et al., 2002). Plusieurs facteurs peuvent affecter le comportement hydrogéologique d'une halde, incluant les propriétés des matériaux, l'angle des pentes, les longueurs des pentes, l'épaisseur des matériaux et les conditions climatiques (Martin et al., 2005). Le système hydrologique (c'est-à-dire les précipitations, l'évaporation, gel-dégel, etc.) entourant les haldes à stériles ne sera pas abordé plus en détail dans cette revue de littérature.

Lorsqu'un matériau contient une phase gazeuse, il est considéré comme étant non saturé. Le matériau non-saturé contient donc trois phases, i.e. solide, liquide ou gazeuse.

2.2.1 Équations de base

La Loi de Darcy (1856) a été établie suite à des essais en laboratoire. Les essais ont démontré qu'en conditions saturées, le débit (q) est proportionnel à l'aire (A) de la section poreuse qu'il traverse, à la perte de charge (Δh) et à l'inverse de la longueur du cylindre parcouru (L) (Fetter, 2001). La loi de Darcy (équation 2-1) a été modifiée par Richards (équation 2-2) pour exprimer le débit spécifique en fonction du degré de saturation du matériau non saturé. En conditions non saturées, les écoulements sont une fonction de la teneur en eau volumique du matériau, qui elle est dépendante de la succion (équation 2-2).

Loi de Darcy (matériaux saturés)

$$v_w = -k_w \frac{\partial h_w}{\partial x} \quad q = k \frac{\Delta h}{L} A = \frac{Q}{t} = kiA = v_w A \quad i = \frac{\Delta h}{L} \quad (2-1)$$

Écoulement non saturé de l'eau en régime permanent ou transitoire (Richards, 1931)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(\psi) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\psi) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(\psi) \frac{\partial h}{\partial z} \right] \right) \quad (2-2)$$

Où :

h : charge hydraulique, [L]

i : gradient hydraulique [-]

k : conductivité hydraulique du matériau [L/T]

t : temps écoulé, [T]

v_w : vitesse de l'eau, [L/T]

θ : teneur en eau volumique, [L³/L³]

ψ : succion, [L]

CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE

La conductivité hydraulique saturée k_{sat} [L/T] (aussi appelée coefficient de perméabilité) d'un matériau décrit le volume d'eau s'écoulant à travers celui-ci en un temps et à une section donné. Ce paramètre est dépendant des propriétés du fluide, de la distribution des vides et des caractéristiques de la surface solide des grains (Mbonimpa et al., 2002). Un matériau saturé aura une conductivité hydraulique constante (pour une porosité donnée), alors qu'un matériau non saturé aura une conductivité hydraulique plus faible et variable en fonction du degré de saturation ou de la succion matricielle (pression négative). Lorsque le matériau n'est pas saturé, les fluides disposent de moins de pores interconnectés par lesquels circuler, donc la conductivité hydraulique est plus faible. La valeur de k dépend aussi de la distribution granulométrique, de la tortuosité, de la forme (indice d'arrondi-angularité) et du degré d'interconnectivité entre les pores conduisant l'eau à travers le matériau (Dane et Topp, 2002).

2.2.2 Essais de laboratoire pour l'évaluation des écoulements

Des essais normalisés au laboratoire peuvent être effectués afin de déterminer la conductivité hydraulique saturée [k_{sat}] des matériaux. L'essai le plus couramment utilisé est l'essai de perméabilité à charge constante et/ou variable, mené selon la norme ASTM D2434. Une description détaillée de ces essais sera faite à la section 3.3 de ce mémoire. La saturation complète de l'échantillon est essentielle au succès de l'essai. Elle s'obtient habituellement en appliquant une pression d'eau plus élevée que la longueur du spécimen de matériaux.

La granulométrie des roches stériles est très étalée avec des tailles variant entre μm et m, il n'est donc pas possible de tester la granulométrie complète en laboratoire. Les roches stériles testées en laboratoire ont une granulométrie tronquée (Aubertin et al., 2008). Les résultats d'essais en laboratoire doivent être combinés avec des techniques d'extrapolation afin de représenter les conditions réelles du terrain. La caractérisation de la conductivité hydraulique des stériles peut aussi être complétée avec des mesures *in situ* à plus grande échelle (Gamache-Rochette, 2004; Fala 2008; Aubertin et al., 2008; Lessard, 2011). Des essais ont d'ailleurs été faits sur la halde à stériles Petit-pas de la Mine du Lac Tio, d'où proviennent les

roches stériles utilisées dans ce mémoire, les détails de ces essais sont présentés dans Lessard (2011; voir aussi la section 3.2).

Des essais de perméabilité en colonnes instrumentées (voir figure 2-4) ont été utilisés pour déterminer la conductivité hydraulique, la courbe de rétention d'eau et la dispersion de l'écoulement avec des roches stériles de diamètre entre 0 et 50 mm (Peregoedova, 2012); la section 3.2 présente un résumé de ces résultats. Dans le cadre de ce mémoire, des essais semblables à ceux de Peregoedova (2012) ont été effectués avec des colonnes ayant un diamètre plus petit, avec une hauteur plus élevée. Le protocole des essais de perméabilité et de drainage dans les colonnes est présenté en détail à la section 4.2 (et à l'annexe B) de ce mémoire.

Le montage en colonne utilisé par Peregoedova (2012) pour réaliser un essai de conductivité hydraulique à charge variable dans une colonne instrumentée (avec mesures de succion et de teneur en eau) et pour obtenir la courbe de rétention d'eau en condition de drainage est illustré à la figure 2.4. Selon les travaux de Peregoedova (2012), faits sur plusieurs fractions granulométriques de stériles, les valeurs de k_{sat} sont pratiquement similaires entre chaque fraction car ce sont les parties fines qui contrôlent la conductivité hydraulique. Par contre, les valeurs prédites avec les modèles Kozeny-Carman [KC] et Kozeny-Carman Modifié [KCM] sous-estiment systématiquement la conductivité hydraulique des stériles de 1 à 2 ordres de grandeur. Les essais effectués par Peregoedova (2012) suggèrent qu'un système de macropores serait à l'origine de cet écart pour des stériles près de la saturation.

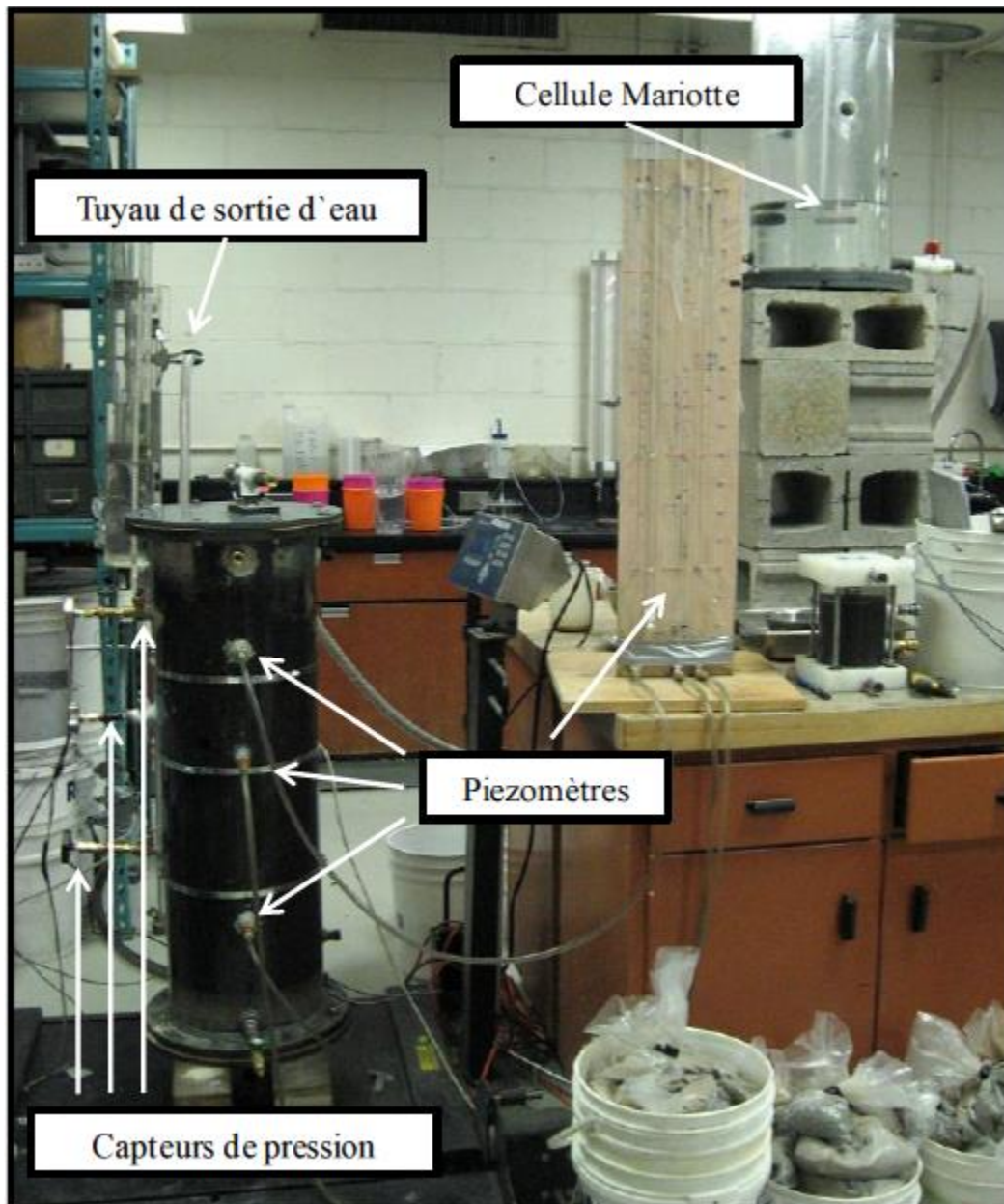


Figure 2.4 : Montage utilisé pour réaliser les essais de perméabilité et pour obtenir la courbe de rétention d'eau en condition de drainage (Peregoedova, 2012)

2.3 Propriétés de base des roches stériles

Cette section présente quelques méthodes d'évaluation des propriétés géotechniques et hydrogéologiques des roches stériles de mines en roches dures.

2.3.1 Masse volumique, porosité et indice des vides

La masse volumique (ou densité) sèche (ρ_d) (équation 2-3) des matériaux est une caractéristique très importante. Cette valeur peut être utilisée pour établir des relations empiriques et pour évaluer et mieux comprendre le comportement du matériau. Les équations et calculs de base sont présentés à l'annexe H.

Masse volumique sèche (ρ_d)

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_T} = D_r(1 - n)\rho_w = (D_r\rho_w)/(1 + e) \quad (2-3)$$

Où :

D_r : Densité relative des grains, [-]

ρ_w : masse volumique de l'eau, [M/L³]

M_s : Masse des grains solide/sec, [M]

V_T : volume total, [L]

n : porosité, [-]

e : indice des vides, [-]

La porosité ($n = V_v/V_T$), et l'indice des vides ($e = V_v/V_s = n/(1-n)$) d'un matériau sont influencés par la distribution granulométrique, l'angularité et le degré de compactage [C_R] (Dane et Topp, 2002). On distingue deux types de porosité, soit primaire et secondaire. La porosité primaire est la plus accessible aux écoulements, alors que la porosité secondaire est emprisonnée dans les particules (ou entre les particules fines) et est peu accessible aux écoulements (Chapuis, 2012). La porosité effective (n_{eff}) est utilisée pour les écoulements d'eau; elle représente la fraction de la porosité primaire où l'eau s'écoule. Ce type de porosité peut être divisée en macroporosité et microporosité. La macroporosité induit un écoulement d'eau par gravité; l'effet capillaire a alors peu d'impact (Peregoedova, 2012). L'écoulement

dans la microporosité est réduit par les effets capillaires. La porosité résiduelle peu accessible aux écoulements fait partie de la porosité secondaire (Chapuis, 2012).

La porosité des roches stériles peut varier entre 6% et 50% (Aubertin et al., 2011). Lessard (2011) a rapporté que la porosité des roches stériles sur le site de la mine Tio (halde Petit-Pas) était entre 35% et 50% (aussi dans Gamache-Rochette, 2004). Peregoedova (2012) décrit l'effet des macro et micro pores dans les roches stériles d'ilmenite ayant une granulométrie variant entre 0-50 mm.

2.3.2 Granulométrie

Les méthodes de minage peuvent avoir un effet sur la granulométrie des roches stériles. Par exemple, les mines souterraines produisent généralement des roches stériles de granulométrie plus fine que les mines à ciel ouvert (Éthier, 2011). La variabilité entre le contenu des voyages de camions engendre aussi un étalement granulométrique hétérogène. L'étalement de la granulométrie présage que les propriétés hydriques et mécaniques varient beaucoup *in situ* et que les méthodes de caractérisation doivent être adaptées en fonction de cette réalité particulière (Aubertin et al., 2002).

La mine du Lac Tio, d'où proviennent les roches stériles tamisées caractérisées dans cette étude, est une mine de roches dures produisant des roches stériles avec un étalement passant du micromètre au mètre. La distribution granulométrique très étalée des roches stériles produit un coefficient d'uniformité (C_u) de plus de 20, mais qui peut atteindre les 300 et plus (McKeown, 2000; Barbour et al., 2001; Aubertin, et al., 2002, ce qui reflète une granulométrie très étalée (Aubertin et al., 2002). Rappelons que le coefficient d'uniformité ($C_U = D_{60}/D_{10}$), le diamètre des particules correspondant à 10% et 60% passants) représente l'étalement granulométrique des particules.

2.3.3 Sphéricité-indice d'arrondi des particules

La sphéricité est reliée à la proportion entre la longueur et la largeur des grains, et l'indice d'arrondi est lié à la courbure des côtés (Krumblein et Sloss, 1963). Les valeurs de sphéricité (anglais : sphericity) et d'indice d'arrondi (anglais : roundness index) peuvent être évaluées en deux dimensions [2D] en arrangeant les particules pour qu'elles soient placées de façon à ce que la projection maximale (le côté le plus long) soit visible. La figure 2.5, tirée de Krumblein et Sloss (1963) peut être utilisée pour une évaluation visuelle des valeurs de sphéricité et d'indice d'arrondi d'un matériau granulaire. Cette estimation visuelle peut être affectée par l'expérience de l'utilisateur, mais les variations de résultats seraient faibles entre les utilisateurs (Krumblein et Sloss, 1963). Toutefois, cette méthode d'estimation semble peu utilisée, selon la littérature consultée.

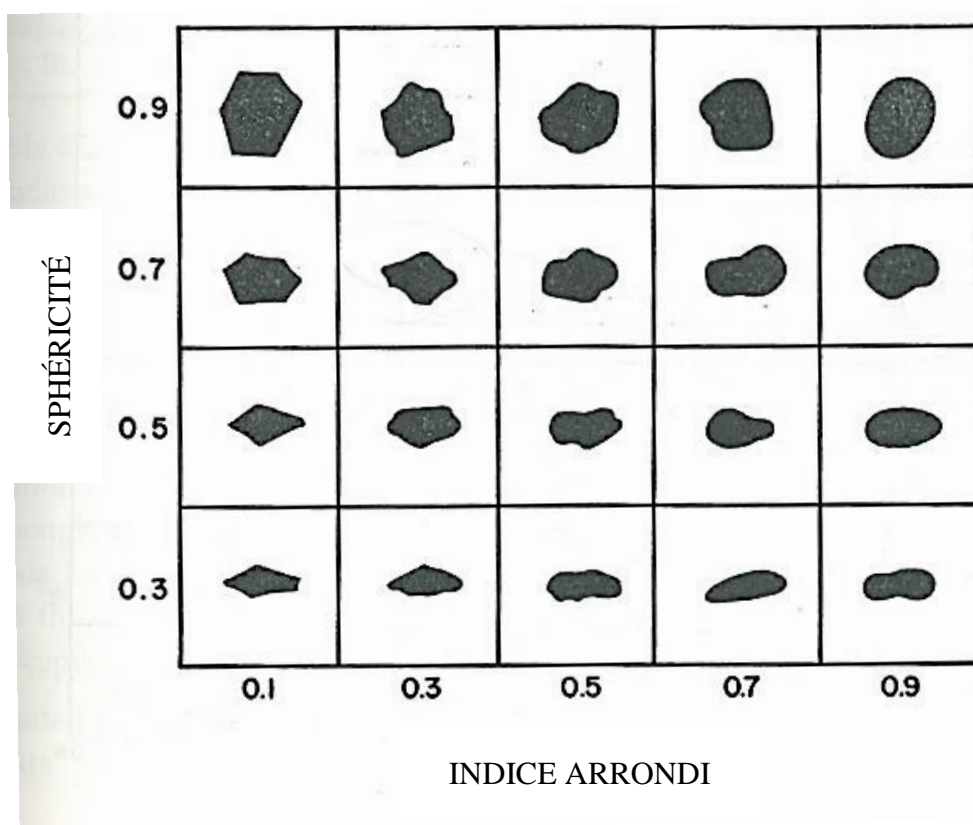


Figure 2.5 : Charte combinée pour l'indice d'arrondi (roundness index) et la sphéricité (sphericity) des sables (tirée de Krumblein et Sloss, 1963)

2.3.4 Propriétés hydrogéologiques

L'eau agit comme agent liant ou lubrifiant entre les particules et elle peut influencer les processus physiques, chimiques et biologiques. Un des aspects critiques qui affecte la production de drainage minier acide [DMA] et de drainage neutre contaminé [DNC] est la distribution et le mouvement de l'eau dans les roches stériles (Aubertin et al., 2005). Le comportement hydrogéologique des stériles a été décrit en détail dans Fala (2002; 2008) et Lessard (2011).

Plusieurs aspects sont à considérer lors de l'évaluation du comportement des haldes à stériles (Morin et al., 1991) :

- Les conditions climatiques, surtout en relation avec les bilans d'eau;
- La conductivité hydraulique saturée des matériaux dans la halde;
- L'hétérogénéité des matériaux;
- Le régime des écoulements, soit laminaire ou turbulent;
- Les paramètres hydrogéologiques de base tels la charge hydraulique, les gradients et la position de la nappe phréatique; et
- Les caractéristiques géochimiques.

Les principaux aspects évalués dans ce projet sont la teneur en eau volumique et la conductivité hydraulique saturée des roches stériles pour différents degrés de compactage. On s'intéresse aussi au taux d'infiltration et aux autres propriétés du matériau sous différentes conditions. Les principaux facteurs qui influencent le taux d'infiltration sont (Dane et Topp, 2002) :

- Les caractéristiques physiques du matériau, dont l'angularité, et la distribution granulométrique qui dépendent de la structure du matériau;
- La porosité n et le degré de compactage C_R du matériau.

Selon Green et Ampt (1911), il est nécessaire de connaître trois paramètres du sol pour comprendre la relation de l'air et l'eau sur celui-ci. Ces paramètres sont la porosité, le coefficient de perméabilité et la valeur d'entrée d'air. Il existe plusieurs relations empiriques et

diverses équations pour faire le lien entre les caractéristiques physiques et hydrogéologiques des matériaux granulaires certaines seront décrites dans ce qui suit.

ESSAIS D'INFILTRATION SUR LE TERRAIN

Des essais d'infiltration à grande et à petite échelle ont été réalisés par Lessard (2011) sur les matériaux de surface de la halde Petit-Pas de la mine du Lac Tio, qui serait constituée principalement d'anorthosite. Un total de six (6) bassins d'infiltration ont été construits sur la halde Petit-Pas afin de mener des essais à grande échelle. Trois (3) des grands bassins ont été construits sur des surfaces compactées et trois (3) autres sur des surfaces plus lâches.

Les essais à petite échelle (décrits aussi dans Gamache-Rochette, 2004), faits avec une chaudière perforée, ont permis d'évaluer la variabilité des vitesses d'infiltration des matériaux à proximité des grands bassins.

Les essais expérimentaux de Lessard (2011) suggèrent que la conductivité hydraulique saturée des stériles en surface de la halde Petit-Pas pourrait varier entre 10^{-2} cm/s et 10^{-3} cm/s, si l'on présume que la durée des essais était suffisante (pour que les conditions représentent les conditions d'équilibre) et que le taux minimum d'infiltration était constant (Lessard, 2011).

PRÉDICTION DE LA VALEUR DE K_{SAT}

Il est coûteux et difficile de mesurer la fonction de perméabilité pour les matériaux. Plusieurs méthodes d'estimation ont été élaborées pour décrire les relations entre la conductivité hydraulique saturée et non saturée des matériaux versus la teneur en eau volumique et la succion matricielle. Les modèles d'estimation ont été séparés en quatre (4) catégories par Fredlund et al. (2012), soit :

1. Modèles empiriques (ex. Brooks and Corey, 1964);
2. Modèles statistiques (ex. Childs and Collis-George, 1950);
3. Modèles par corrélation (ex. Leong, and Rahardjo, 1997); et
4. Modèles par régression (ex. Fredlund et al., 1994).

Ces modèles sont décrits dans Fredlund et al. (2012) et ne seront pas présentés en détail ici à l'exception du modèle de régression, car il est utilisé dans la modélisation numérique par SEEP/W (voir section 2.5.1).

La conductivité hydraulique saturée des sols et des matériaux poreux peut être mesurée directement avec des essais de terrains ou de laboratoire (Chapuis, 2012). Il est aussi possible d'estimer la conductivité hydraulique saturée à l'aide de modèles prédictifs basés sur des propriétés géotechniques.

Bien que les modèles prédictifs ne remplacent pas les essais, ceux-ci peuvent être utilisés à titre indicatif lors des étapes préliminaires de projet afin de gagner du temps et pour obtenir un aperçu des valeurs mesurées. Afin d'estimer la conductivité hydraulique saturée des matériaux, deux modèles prédictifs ont été étudiés dans le cadre de cette revue de littérature. Ces modèles sont ceux de Mbonimpa et al. (2002) et Chapuis et Aubertin (2003).

Surface spécifique

Les modèles prédictifs de Mbonimpa et al. (2002) [KCM : Kozeny-Carman Modifié] et de Chapuis et Aubertin (2003) [KC : Kozeny-Carman], utilisent la surface spécifique [S_s] pour estimer la conductivité hydraulique du matériau. Cette propriété représente la surface totale des particules par unité de masse solide. Une méthode pour évaluer la surface spécifique calculée à partir de la courbe granulométrique complète des matériaux a été proposée par Chapuis et Légaré (1992) selon l'équation suivante :

Surface spécifique S (ou S_s)

$$S = \frac{6}{\rho_s} \sum \left(\frac{P_{NoD} - P_{Nod}}{d} \right) \quad (2-1)$$

Où :

d : particules de diamètre plus petit que D , [L]

D : particules de diamètre plus grand que d , [L]

P_{NOD} : Pourcentage de particule de diamètre D, [%]

P_{NOd} : Pourcentage de particule de diamètre d, [%]

ρ_s : Densité des particules solides, [M/L³]

Modèle Kozeny-Carman [KC]

La conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) d'un matériau peut être estimée en utilisant la méthode semi-empirique de Kozeny-Carman (Chapuis et Aubertin, 2003). Cette méthode permet d'estimer k_{sat} pour des matériaux relativement homogènes en fonction de la surface spécifique de celui-ci. Cette méthode prédit k_{sat} typiquement entre $1/3$ et 3 fois la valeur mesurée en laboratoire pour des matériaux ayant une conductivité hydraulique entre 10 cm/s et 10^{-9} cm/s (Chapuis et Aubertin, 2003), ceci est aussi la marge pour les essais en laboratoire. En premier lieu, il faut estimer la surface spécifique du matériau à partir de sa courbe granulométrique (selon l'équation 2-1).

La relation pour prédire la conductivité hydraulique saturée est présentée aux équations 2-2 et 2-3.

Prédiction de la conductivité hydraulique selon Kozeny-Carman [KC]

$$\log[k_{prédit}] = A + \log \left[\frac{e^3}{D_R^2 S^2 (1 + e)} \right] \quad (2-2)$$

Où

$$k_{sat} = \frac{c_g}{\mu_w \rho_w S_s^2 D_r^2} \frac{e^3}{(1 + e)} \quad (2-3)$$

Où :

A : constante variant de 0,29 à 0,51. [-]

c_g : facteur de tortuosité, constante variant entre 0,2 et 0,5, [-]

D_r : densité relative des grains, [-]

g : accélération gravitationnelle, [L/T²]

μ_w : viscosité dynamique de l'eau ($\approx 10^{-3}$ Pa·s à 20 C°), [PT]

Modèle Kozeny-Carman Modifié [KCM]

Le modèle Kozeny-Carman modifié [KCM] (Aubertin et al., 1996; Mbonimpa et al., 2002) estime la valeur de la conductivité hydraulique saturée en se basant sur des propriétés pédologiques soit la granulométrie et la porosité. Seulement l'équation pour les matériaux granulaires (non cohérents) est présentée ici. Cette équation est considérée valide pour les conditions suivantes (Mbonimpa et al., 2002) :

- une conductivité hydraulique saturée [k_{sat}] entre 10² cm/s et 10⁻⁸ cm/s;
- Un indice des vides [e] entre 0,35 et 1,27;
- Un coefficient d'uniformité [C_u] entre 1 et 227;
- Un D_{10} entre 4x10⁻⁵ mm et 15 mm et
- Une limite de liquidité plus faible ou égale à 20%.

L'incertitude pour l'estimation de la conductivité hydraulique avec cette méthode serait d'un demi (½) ordre de grandeur (i.e. $1/5 \leq \text{facteur} \leq 5$) pour des matériaux considérés comme étant isotropes et homogènes.

L'équation globale de prédiction de la conductivité hydraulique saturée pour matériau granulaire [k_G] est :

$$k_G = C_G \frac{\gamma_w}{u_w} \frac{e^{3+x}}{1+e} C_u^{1/3} D_{10}^2, \quad x = 2 \quad (2-4)$$

Constante utilisée pour l'équation générale pour les matériaux granulaires [C_G]

avec $C_G = 0,1$

Estimation de la fonction de perméabilité (ou conductivité hydraulique) non saturée

Le logiciel RETC (RETention Curve) peut être utilisé afin de définir une fonction de perméabilité non saturée pour le matériau étudié (van Genuchten et al., 1991). Le modèle peut alors être ajusté avec des résultats expérimentaux (CRE) pour plus de précision (Mbonimpa et al., 2006). La fonction de perméabilité non saturée est établie en fonction de la teneur en eau volumique θ_v ou du degré de saturation effectif S_e .

La conductivité hydraulique non saturée peut être estimée selon l'équation de Mualem (1976) et van Genuchten (1980)

$$k(S_e) = k_{sat} S_e \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m_v} \right)^{m_v} \right], \quad m_v = 1 - 1/n_v \quad (2-5)$$

Degré de saturation effective ou teneur en eau volumique effective (Dane et Topp 2002)

$$S_e = \frac{(\theta_v - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \equiv \theta_e \quad (2-6)$$

Où :

n_v, m_v : paramètres du modèle van Genuchten (1980), [-]

θ_r : teneur en eau résiduelle, [L³/L³]

θ_s : teneur en eau saturée, [L³/L³]

θ_v : teneur en eau volumique, [L³/L³]

COURBE DE RÉTENTION D'EAU [CRE]

La courbe de rétention d'eau [CRE] permet d'établir la relation entre la teneur en eau volumique θ_v (ou S_r) et la succion matricielle ψ (pression négative). La rétention d'eau dans un sol dépend de la forme, grosseur et distribution des vides $[e]$, la minéralogie, la surface spécifique des grains solides $[S_s]$ et la composition chimique des eaux interstitielles (Aubertin

et al., 2003). La succion, associée aux forces capillaires, est une pression d'eau négative exercée au-dessus de la nappe d'eau. La succion ($\psi = u_a - u_w$) peut être exprimée en termes de pression (kPa) ou de charge de pression d'eau (m ou cm d'eau – cm H₂O). Plus la succion augmente plus la teneur en eau volumique (θ) du matériau diminue, et plus l'écoulement de l'eau se fait difficilement à cause de l'aire d'écoulement qui est réduite (de moins en moins de pores saturés en eau) et de l'augmentation de la tortuosité due à l'augmentation de la phase gazeuse.

Suite à l'obtention de la relation entre la teneur en eau volumique et la succion, il est possible de déduire la conductivité hydraulique non saturée en fonction de la succion matricielle $k(\psi)$ ou de la teneur en eau volumique θ_v . Quelques paramètres caractéristiques peuvent être déterminés pour des fins d'analyses subséquentes, comme : la pression d'entrée d'air [air entry value-AEV] (ψ_a), la succion résiduelle [water entry value-WEV] (ψ_r), la teneur en eau résiduelle (θ_r) et la teneur en eau à saturation (θ_s), qui est souvent considérée égale à la porosité (n) (Aubertin et al., 1996, 2002, 2015).

La figure 2.6a illustre la teneur en eau volumique en fonction de la succion appliquée pour un sable et un silt. La valeur d'entrée d'air (ψ_a) représente l'ampleur de la succion qui doit être appliquée pour entamer le drainage des plus gros pores. Sur ces courbes, on peut observer que la teneur en eau volumique du sable atteint sa teneur en eau résiduelle θ_r [L³/L³] alors que le silt atteint sa pression d'entrée d'air ψ_a . La teneur en eau résiduelle est la condition qui prévaut dans le matériau à haute succion, c'est-à-dire ψ plus grande que ψ_r . À succions égale ce sable sera presque drainé (désaturé) alors que le silt sera presque saturé.

Les paramètres caractéristiques de la CRE peuvent être estimés à l'aide de la méthode des tangentes sur un graphique semi-logarithmique ou à partir des équations présentées plus haut. La succion d'entrée d'air (ψ_a) est la succion à laquelle l'air commence à entrer dans les plus grands pores de la matrice du matériau. La succion résiduelle (ψ_r) est la succion à laquelle l'eau est surtout retenue par adhésion à la surface des grains (Aubertin et al., 2003).

La fonction de la perméabilité non saturée des matériaux varie aussi en fonction de la succion appliquée en relation avec la courbe de rétention d'eau. La figure 2.6b illustre les fonctions de

perméabilité en fonction de la succion appliquée pour un sable et un silt. Lorsqu'un matériau grossier (tel un sable) se désature pour atteindre la teneur en eau résiduelle, la conductivité hydraulique de ce matériau sera usuellement plus faible que celle d'un matériau plus fin (tel un silt) à la même succion.

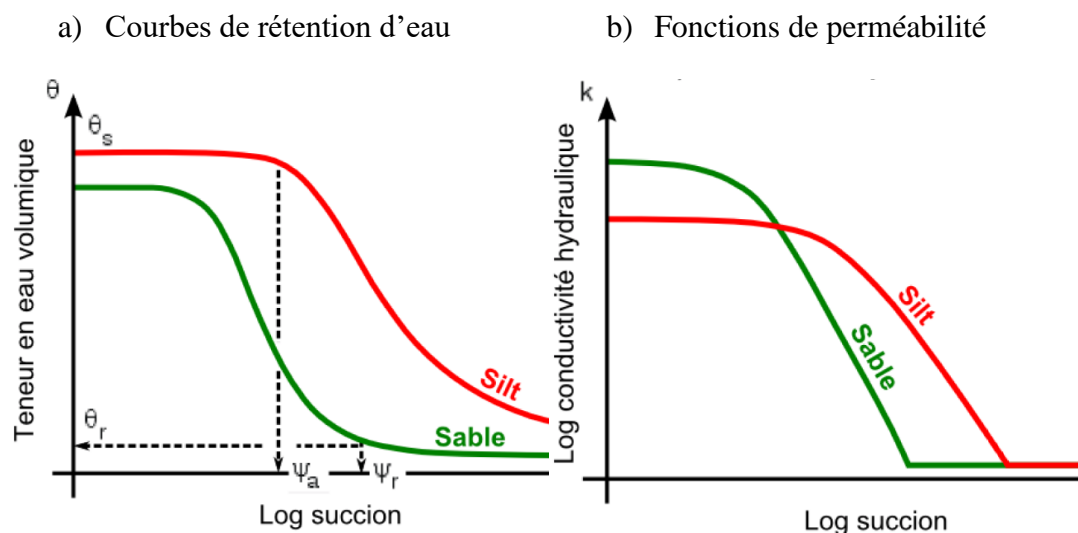


Figure 2.6 : Courbes de rétention d'eau (a) et fonctions de perméabilité (b) idéalisées pour un sable et un silt (tiré d'Aubertin et al., 2015)

Essais en laboratoire pour déterminer la courbe de rétention d'eau

La courbe de rétention d'eau est habituellement obtenue en laboratoire avec les essais en colonne suspendue, en chambre pressurisée (Tempe cell) ou avec l'essai de plaques à pressions (ASTM D6836, 2012). Les essais de drainage en colonnes ont été développés parce que les résultats obtenus avec les essais précédemment mentionnés peuvent être faussés pour des matériaux grossiers dus à leur teneur en eau qui diminue rapidement entre les succions matricielles de 0 kPa et 10 kPa (Gamache-Rochette, 2004; Chapuis et al., 2006a). Les essais effectués dans le cadre de cette recherche ont suivi le protocole suggéré par Chapuis et al. (2006a), avec des tensiomètres placés sur la paroi de la colonne pour mesurer la pression (ou la succion) instantanée. La description complète du protocole des essais en colonne ainsi que les méthodes de utilisés pour les essais de perméabilité et de drainage sont décrit à la section

4.2 et l'annexe B de ce mémoire. Les essais en colonne permettent de faire des essais de perméabilité pour évaluer la conductivité hydraulique et des essais de drainage pour évaluer la courbe de rétention d'eau pour les matériaux granulaires grossiers.

Méthodes de prédiction pour la CRE

Des méthodes de prédiction ont été élaborées par plusieurs auteurs afin d'évaluer la courbe de rétention d'eau et la conductivité hydraulique des matériaux. Afin d'utiliser les méthodes de prédiction, il est essentiel de mesurer les valeurs de densité des matériaux en place à partir desquelles les indices des vides seront déterminés pour obtenir des prédictions comparables aux conditions réelles de terrain.

La courbe de rétention d'eau [CRE] peut être mesurée en laboratoire ou *in situ*, mais les tests peuvent être longs et coûteux. Il est avantageux d'estimer la CRE à partir de modèles prédictifs parce qu'ils sont facilement applicables à moindres coûts. L'évaluation de la CRE peut être estimée à partir du modèle Kovacs modifié [MK], tel que décrit dans Aubertin et al. (1998; 2003) pour un matériau granulaire. La méthode permet d'estimer la CRE à partir des propriétés géotechniques de base d'un matériau. Le modèle MK postule que la rétention d'eau est le résultat des effets combinés de la capillarité et des forces d'adhésion, pour des matériaux isotropes et homogènes sous l'influence du drainage. Le modèle Kovacs modifié [MK] (Aubertin, et al., 2003), a été adapté pour les stériles [MKs] (Peregoedova, 2012; 2013).

Modèle Kovacs Modifié [MK]

Les équations qui suivent (2-7 à 2-14) proviennent du modèle MK tel que décrit par Aubertin et al. (2003). Il est suggéré d'utiliser ce modèle avec réserve, car plusieurs facteurs qui peuvent influencer la courbe de rétention ont été négligés. Ces facteurs (énumérés par les auteurs) incluent : les conditions de compactage qui peuvent affecter la microstructure et la distribution des espaces vides, le phénomène d'hystérésis de la CRE, le changement de volume de l'échantillon pendant les tests, l'historique des contraintes sur le matériau, l'existence de zones hétérogènes et la présence de particules très grossières (Aubertin et al., 2003).

Diamètre équivalent des particules

$$D_H = [1 + 1,17 \log C_u] D_{10} \quad (2-7)$$

Remontée capillaire équivalente

$$h_{c0} = \frac{\sigma_w \cos \beta_w}{\gamma_w} \frac{\alpha}{e D_H} \quad (2-9)$$

Succion d'entrée d'air,

$$\psi_{a,MK} = \frac{b_1}{(e D_H)^{x_1}} \quad (2-11)$$

Succion résiduelle, équation #1 (cm H₂O)

$$\psi_r = \frac{0,42}{(e D_H)^{1,26}} \quad (2-13)$$

Où :

a_c : coefficient d'adhésion, [-]

α : facteur de forme, [-]

β_w : angle de contact, 0°, [-]

D_H : diamètre équivalent des grains pour un échantillon hétérogène (cm), [L]

h_{c0} : montée capillaire équivalente (cm), [L]

σ_w : tension de l'eau en surface, 0,073 N/m [F/L]

Degré de saturation

$$S_r = \frac{\theta}{n} = S_c + S_a^* (1 - S_c) \quad (2-8)$$

Composante de capillarité ($m = 1/C_u$)

$$S_c = 1 - \left[\left(\frac{h_{c0}}{\psi} \right)^2 + 1 \right]^m \exp \left[-m \left(\frac{h_{c0}}{\psi} \right)^2 \right] \quad (2-10)$$

Composante d'adhésion

$$S_a^* = 1 - \langle 1 - S_a \rangle$$

$$S_a = a_c C_\psi \left[\frac{\left(\frac{h_{c0}}{\psi_n} \right)^{2/3}}{e^{1/3} \left(\frac{\psi}{\psi_n} \right)^{1/6}} \right] \quad (2-12)$$

Coefficient forçant la teneur en eau vers zéro

$$C_\psi = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{\psi_0}{\psi_r} \right)} \quad (2-14)$$

S_a : composante d'adhésion du degré de saturation, [-]

S_c : composante de capillarité du degré de saturation, [-]

ψ_n : paramètre de normalisation

ψ_0 : succion sèche, [L]

ψ_{aMK} : succion à la valeur d'entrée d'air (AEV) déterminée avec la CRE du modèle MK, ($b_1 = 0,6$ et $x_1 = 0,8$), [L]

Modèle Kovacs Modifié pour les stériles [MKs]

Peregoedova (2012) a noté que la teneur en eau résiduelle de la CRE était systématiquement sous-estimée par le modèle MK dans le cas des roches stériles (voir aussi Peregoedova et al., 2013); La valeur d'entrée d'air AEV prédite est toutefois proche des valeurs mesurées au laboratoire. Des modifications au modèle ont été proposées pour la partie 'résiduelle' de la CRE associée à la saturation d'adhésion (S_a). Deux équations sont modifiées pour calculer la remontée capillaire équivalente (h_{co}) et la succion résiduelle (ψ_r).

$$h_{co_adhésion} = h_{co} \times \frac{D_H}{D_{H_CL}} \quad (2-15)$$

Où :

D_{H_CL} : Diamètre équivalent calculé à partir de la surface spécifique selon la méthode de Chapuis et Légaré (1992)

$h_{co_adhésion}$: Remontée capillaire équivalente pour la détermination de la saturation d'adhésion, S_a [L]

Ajustement pour la succion résiduelle utilisée pour la détermination de la saturation d'adhésion

$$\psi_{r_ajustée} = \psi_r \times \left(\frac{D_H}{D_{H_CL}} \right)^{1,26} \quad (2-16)$$

Peregoedova (2012) a comparé les courbes de rétention d'eau obtenues pour les roches stériles de la mine Tio en fonction des prédictions MK et MK_s pour des distributions granulométriques complètes et tronquées à 80 µm. La comparaison des deux modèles est présentée à la figure 2.7; on observe que le modèle MK sous-estime systématiquement les valeurs de teneur en eau obtenues au laboratoire. Les valeurs obtenues avec le modèle MK_s montrent une meilleure concordance avec les données expérimentales.

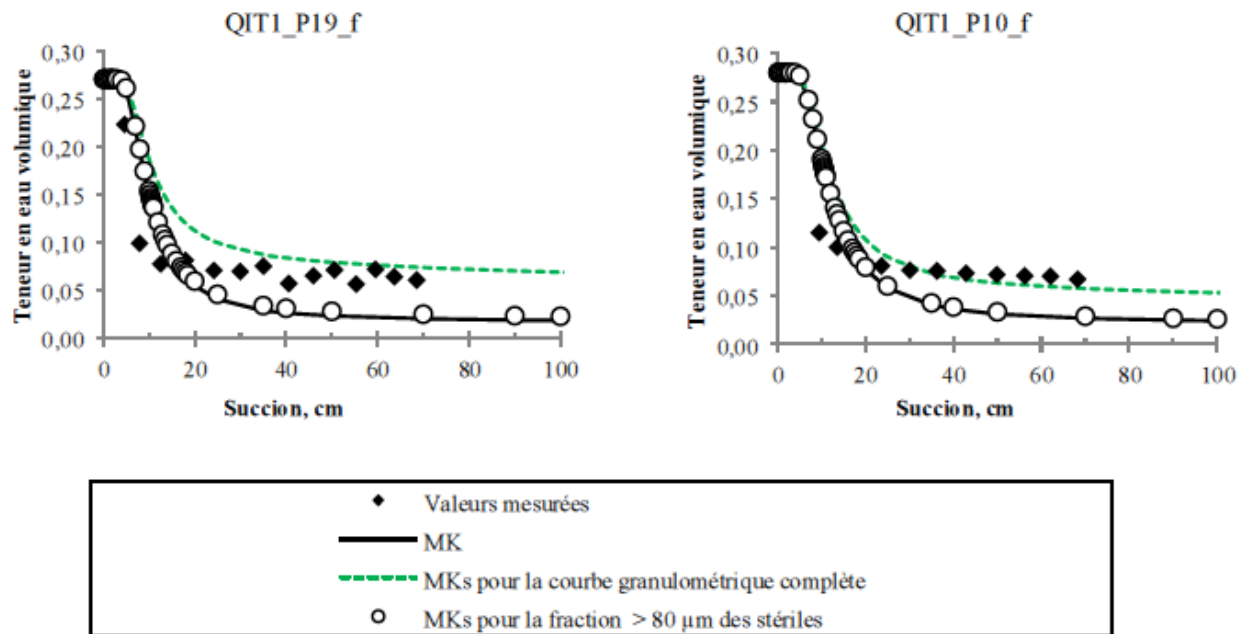


Figure 2.7 : Exemple de CRE mesurées et prédites pour des roches stériles à l'aide des modèles MK et MK_S (tiré de Peregoedova, 2012).

TAUX INFILTRATION

Le modèle de calcul de l'infiltration de Green et Ampt (1911) est simple et applicable avec les essais en cuve exécutés dans le cadre de cette recherche, car le calcul est surtout applicable pour l'infiltration dans les sols grossiers relativement secs (Hillel, 1998). Les roches stériles sont grossières et la teneur en eau optimale pour la compaction est basse. Dans le modèle de Green et Ampt (1911), l'eau pénètre dans le sol sous un front de mouillage saturé qui avance pendant les précipitations (ou l'ajout d'eau). Avant que le front de mouillage (teneur en eau volumique saturée θ_s) atteigne une zone, celle-ci est considérée comme étant à teneur en eau volumique initiale θ_i (Hillel, 1998).

Le taux d'infiltration i [LT^{-1}] est le volume d'eau entrant le matériau par unité de surface de matériau par unité de temps. Le taux d'infiltration peut atteindre la capacité d'infiltration maximale du matériau. Cette capacité i_c [LT^{-1}] est le taux maximal auquel le matériau peut absorber de l'eau depuis la surface, il varie en fonction de la teneur en eau initiale du matériau, la suction et des paramètres de caractérisation géotechnique. Lorsqu'une charge d'eau est

appliquée sur une longue durée, la capacité d'infiltration diminue jusqu'à une valeur minimale. Le taux d'infiltration i est défini par l'équation suivante (Hillel, 1998; Lessard, 2011) :

$$i = i_c + b/l, i > i_c \quad (2-17)$$

Où :

b = constante de caractérisation, [-]

l = infiltration cumulée, [L]

Le profil de teneur en eau volumique de ce modèle (voir figure 2.8) ne contient pas de zone de transition entre la teneur en eau volumique initiale θ_i et saturée θ_s , comme montré à la figure 2.8.

Lessard (2011) a décrit dans son mémoire l'intégration de la loi de Darcy et le principe de continuité pour le front de mouillage avec le modèle de Green et Ampt (1911). Ceci a mené à une équation suivante présentée par Miyazaki (2005) (Lessard, 2011) :

$$i = k_{sat} \frac{h_0 - h_f + z_f}{z_f} = k_{sat} \frac{h_0 + \psi_f + z_f}{z_f} \quad (2-18)$$

Où :

h_0 = charge hydraulique à la surface, [L]

h_f = charge finale, [L]

ψ_f = succion au front de mouillage présumé, [L]

z_f = épaisseur de la zone mouillée présumée, [L]

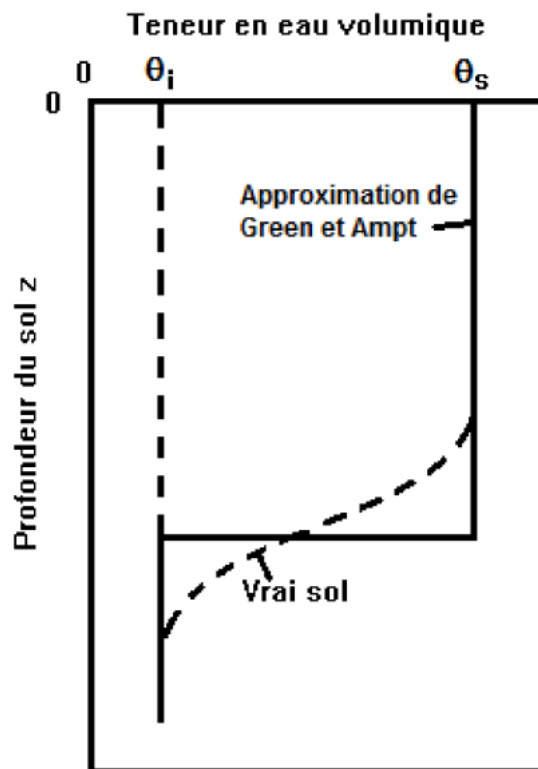


Figure 2.8 : Profil de la teneur en eau volumique selon le modèle de Green et Ampt (1911)
(tiré de Lessard, 2011)

2.4 Recouvrement des haldes

Un recouvrement peut avoir divers objectifs, selon la problématique associée avec un site d'entreposage de rejets miniers. L'un des principaux objectifs est de créer une barrière hydrogéologique pour limiter l'infiltration de l'eau et/ou des gaz. Une technique bien connue (surtout pour les parcs à résidus) pour limiter l'écoulement des fluides (liquides et gazeux) consiste en la mise en place d'un recouvrement multicouche (Aubertin et al., 2002a). Celui-ci permet de contrôler le mouvement des fluides afin de minimiser le potentiel de génération du drainage minier acide [DMA] ou du drainage neutre contaminé [DNC]. Les recouvrements sont des ouvrages de longue durée (quasi permanents) qui doivent être stables physiquement, chimiquement et biologiquement afin d'être durables et performants à long terme (à perpétuité).

dans plusieurs cas). La conception et la performance des systèmes de recouvrement peuvent être affectées par plusieurs facteurs, qui sont décrits dans Aubertin et al., (2015).

2.4.1 Barrière capillaire

Une barrière capillaire est composée de matériaux suffisamment fins placé sur un matériau grossier pour limiter l'infiltration de l'eau jusqu'au matériau sous-jacent par effet de capillarité en conditions non saturées. Lorsqu'il y a infiltration, la barrière capillaire peut emmagasiner l'eau et l'empêcher de s'infiltrer jusqu'à la couche sous-jacente. Ce phénomène est appelé '*effet de barrière capillaire*'. Les barrières capillaires permettent de limiter les écoulements dans les matériaux réactifs sous-jacents ce qui a pour effet de réduire la production de DMA ou DNC (Aubertin et al., 1995, 2002, 2015; Bussière et al., 2003; MEND 2004).

Typiquement, une couverture à effet de barrière capillaire [CEBC] est faite de matériaux ayant diverses propriétés non saturées et est utilisée pour contrôler la diffusion d'oxygène (O_2) en climat humide. Les propriétés caractérisant les CEBC sont décrites en détail dans plusieurs rapports et articles, dont Aubertin et al. (1995, 2002, 2009).

En condition climatique humide, le bilan d'eau à long terme est positif, car l'évaporation est plus faible que les précipitations totales moyennes. L'évaluation de l'efficacité des recouvrements en conditions humides est donc contrôlée par le régime de précipitations (Aubertin et al., 2009). La configuration typique d'une CEBC en climat humide peut compter jusqu'à cinq (5) couches. Chacune des couches (A à E) a une fonction spécifique voir figure 2.9. Celles-ci sont décrites dans ce qui suit brièvement et dans les articles de Aubertin, et al., (1995, 2002, 2015) en détail.

À l'interface des matériaux fins (surface; figure 2.9 couche D) et grossiers (dessous; figure 2.9 couche E), le matériau grossier a une conductivité hydraulique saturée élevée en comparaison avec le matériau fin (voir figure 2.9, couche de faible perméabilité - D). Cette dernière a une plus grande capacité de rétention d'eau (Aubertin et al., 2009). Ces différences de propriétés entre les matériaux auront pour effet de garder la couche de matériau fin plus saturée et de limiter le transfert d'eau par capillarité.

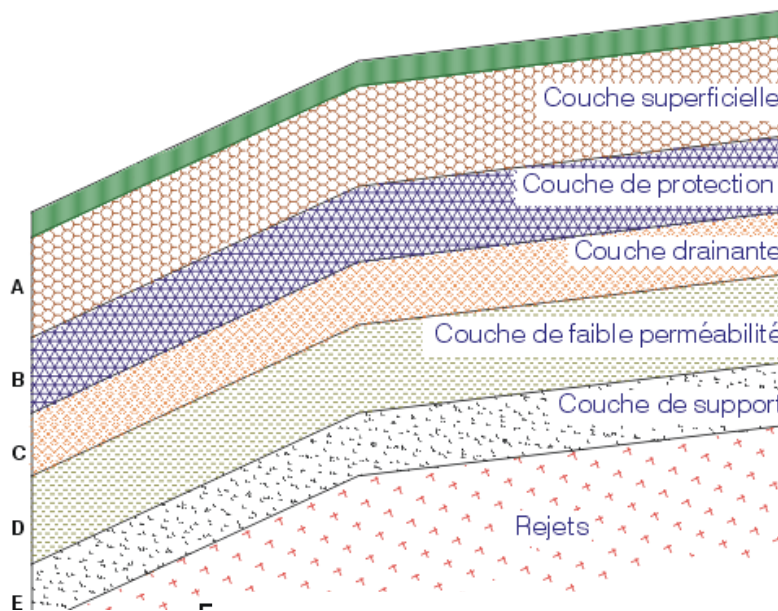


Figure 2.9 : Configuration générale d'un système de recouvrement multicouches (tiré de : Aubertin et al., 2002, 2015)

Lorsqu'ils peuvent maintenir un niveau de saturation élevé, les recouvrements subhorizontaux sont relativement efficaces pour réduire les flux de gaz parce que la couche à faible perméabilité crée une barrière à l'oxygène à degré de saturation élevé. La particularité des haldes à stériles est que leurs cotés sont fortement inclinés ce qui limite la possibilité de maintenir un haut degré de saturation dans la haute de la pente (Bussière, et al., 2003) L'effet de l'inclinaison sur l'infiltration d'eau dans le recouvrement (e.g. Aubertin et al. 2009) ne sera pas traité dans cette étude, car les essais sont sur des couches horizontales.

2.5 Simulations numériques

Les modèles numériques constituent un outil pour aider à mieux comprendre les interactions et les phénomènes hydrogéologiques (et géochimiques) dans les haldes à stériles à court et à long terme. Ils sont utiles pour évaluer l'effet de certains facteurs et paramètres impliqués, pour comparer différents scénarios de disposition des stériles et les conditions de fermeture et de restauration du site (Aubertin et al., 2005). Au cours des dernières années, plusieurs

simulations du comportement hydrogéologique des haldes ont été effectuées dans le cadre de travaux menés par la Chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT en environnement et gestion des rejets miniers (2001 à 2012) et par d'autres chercheurs dans le domaine. Les simulations touchent l'écoulement non saturé dans les haldes à stériles uniformes et hétérogènes (Fala, 2003; Aubertin et al., 2005, 2008; Dawood 2011; Broda 2015) avec ou sans recouvrement (Zhan et al., 2001; Martin et al., 2005). Les simulations ont aussi évalué le comportement géochimique des haldes en fonction des écoulements non saturés (Aubertin et al., 2005, 2008; Molson et al., 2005; Fala et al., 2006). Quelques-résultats de simulations ont été retenus pour illustrer les phénomènes dominants dans les haldes à stériles.

Pour les logiciels de modélisation les plus couramment utilisés sont Seep/W (Geo-Slope International Inc.), Hydrus (PC Progress) et HydroGeoSphere (Aquanty). Ces logiciels permettent la modélisation par éléments finis en 1-D (tous), 2-D (tous) ou 3-D (HydroGeoSphere). Le programme choisi pour l'analyse numérique des essais en cuve dans cette étude est Seep/W parce que l'auteur a une bonne connaissance de ce logiciel. Il est décrit succinctement dans ce qui suit. Le logiciel Hydrus est aussi décrit sommairement car il a été utilisé par plusieurs auteurs afin de d'analyser les écoulements dans les haldes .

2.5.1 Logiciel SEEP/W

Seep/W est un logiciel qui fait partie de la suite Geo-Slope International et qui peut être utilisé pour faire des analyses d'écoulement de l'eau. Le logiciel utilise des éléments finis pour résoudre des problèmes en deux dimensions (2D) soit en plan, en coupe ou en axisymétrie autour d'un axe vertical. Le logiciel est aussi disponible en trois dimensions (3D), mais ne sera pas discuté ici. Le logiciel est basé sur la loi de Darcy (voir section 2.2.4) et l'équation de la continuité selon l'équation proposée par Richards (1931) ou la version simplifiée comme suit :

$$\text{div}(\mathbf{kgrad}(h)) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2-19)$$

Le logiciel de modélisation SEEP/W postule que les contraintes totales (pas de consolidation) et la pression d'air sont des constantes, donc la seule variable est la pression d'eau u_w (suction)

d'eau matricielle, ψ_w). La pression d'eau est une composante de la conductivité hydraulique $[k(u_w)]$ et de la teneur en eau volumique $[\theta(u_w)]$. Lorsque u_w est plus grand ou égale à zéro on doit assumer le degré de saturation à 100%, donc la teneur en eau volumique est égale à la porosité.

Le modèle de régression de Fredlund et al. (1994) est utilisé par le logiciel SEEP/W pour estimer les CRE et la fonction de perméabilité à utiliser pour les matériaux. Dans ce modèle de régression, il est présumé que le changement de volume de la structure du sol est négligeable lorsque la succion du sol change. L'équation proposée pour décrire la CRE par Fredlund et Xing (1994) pour l'étalement complet de la succion (c'est-à-dire de 0 à 10^6 kPa) est la suivante (voir Fredlund et al., 2012) :

$$\theta = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a_f} \right)^{n_f} \right] \right\}^{m_f}} \quad (2-20)$$

Où :

e = nombre naturel 2,711828

a_f = point de courbure relié à la valeur d'entrée d'air (AEV)

n_f = paramètre qui contrôle la pente au point de courbure dans la CRE

m_f = paramètre relié à la teneur en eau volumique résiduelle θ_r

$C(\psi)$ = fonction de correction défini comme suit : $C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1+\psi/\psi_r)}{\ln(1+10^6/\psi_r)}$

ψ_r = succion résiduelle, [L]

La succion d'entrée d'air (AEV ou ψ_a) doit être déterminée indépendamment pour utiliser l'équation afin de déterminer le coefficient de perméabilité, (voir Fredlund et al., 2012) :

$$k_r(\psi) = \frac{\int_{\psi}^{\psi_r} \frac{\theta(y) - \theta(\psi)}{y^2} \theta'(y) dy}{\int_{\psi_a}^{\psi_r} \frac{\theta(y) - \theta_s}{y^2} \theta'(y) dy} \quad (2-21)$$

Où :

ψ_a = succion d'air, [L]

y = variable de l'intégration représentant la succion

θ' = dérivé de l'équation (2-20)

Des modules peuvent être ajoutés dans la suite de programmes de Geo-Slope International pour analyser la convection de chaleur et le transport de lixiviat, mais ceux-ci n'ont pas été évalués pour cette revue de littérature.

La majorité des modèles conceptuels ont été construits afin de représenter les conditions des haldes à stériles de manière axisymétrique (trois dimensions [3D]) ou en deux dimensions [2D]). Cela signifie que la halde est présumée circulaire en 3D sur un axe vertical ou en 2D avec une largeur transversale (dans la page) d'un mètre (Fala et al., 2003).

2.5.2 HYDRUS 2D

Hydrus 2D est un logiciel de modélisation qui peut être utilisé pour l'analyse des écoulements d'eau, de chaleur et de lixiviat dans les matériaux poreux. Le logiciel utilise des éléments finis linéaires pour résoudre l'équation de Richards (1931) (voir équation 2-2) pour l'écoulement de l'eau en milieu saturé et non saturé, et les lois de Fick (équations advection et dispersion) pour le transport de la chaleur et des lixiviats. Comme SEEP/W, HYDRUS 2D (version 2.0) utilise les éléments finis pour l'évaluation des écoulements non saturés (Fala et al., 2003). Les tassements et la consolidation ne sont pas pris en compte dans le logiciel; les matériaux sont considérés comme étant incompressibles.

2.5.3 Distribution et écoulement de l'eau

Selon des études menées par plusieurs auteurs et reconfirmé par Rahardjo et al. (2014), la courbe de rétention d'eau et la fonction de perméabilité sont des paramètres critiques pour simuler les écoulements d'eau correctement. Sans ces données critiques, la modélisation ne sera pas en accord avec les données obtenues avec l'instrumentation (Rahardjo et al., 2014).

La distribution et l'écoulement de l'eau des matériaux dans les haldes peuvent être simulés numériquement pour prédire les écoulements en fonction des conditions appliquées.

Barrières horizontales et subhorizontales

L'effet des barrières capillaires sur les surfaces horizontales et subhorizontales a été étudié par plusieurs auteurs, dont Fala et al., (2003, 2005 et 2006) & Aubertin et al., (2002, 2008). Ces articles ont été retenus dans ce mémoire afin d'illustrer les principaux phénomènes applicables aux haldes à stériles avec recouvrement.

Fala et al., (2003) décrit les résultats des simulations de haldes à stériles composés de deux types de matériaux : un rejet sableux fin homogène [SBL] et un rejet graveleux [GVL]. Les résultats montrent que lorsque la halde est composée de matériaux homogènes (soit le sable, soit le gravier), l'avancement du front de mouillage est uniforme et proportionnel à la recharge efficace. Quand des zones sableuses sont insérées (horizontalement ou en pente) dans une halde composée majoritairement de gravier, le sable crée un effet de barrière capillaire en conditions non saturées. L'eau s'infiltre alors dans les zones de gravier seulement lorsque la succion dans le sable atteint la pression d'entrée d'air (ψ_a) du gravier. L'écoulement d'eau dans les zones de gravier favorise la création de zones ayant un faible degré de saturation où les gaz sont transportés librement. La combinaison de l'eau et des gaz (contenus dans l'air) pourrait favoriser l'oxydation des matériaux réactifs s'il y a un apport suffisant des deux éléments.

Dans le modèle avec des couches sableuses horizontales (présenté à la figure 2.10), lorsque la capacité d'infiltration est excédée, l'eau percole dans la couche sous-jacente (voir les zones en bleu ou gris foncé de la figure 2.10). Les zones en mauve/rose (ou gris pâle) sont des endroits

où l'eau ne percole pas, selon le modèle (voir figure 2.10). Lorsque le modèle de simulation a été construit avec des couches de sable inclinées à 5% (subhorizontales), la percolation de l'eau à partir de l'horizon de sable vers le gravier a été dirigée vers l'extérieur (voir figure 2.10). La distribution de l'eau n'est pas uniforme et suit la distribution des propriétés hydrique des matériaux (Aubertin et al., 2008).

La principale différence entre les modèles ayant des couches sableuses subhorizontales versus horizontales est que la couche subhorizontale favorise l'écoulement latéral qui est causé par l'effet de barrière capillaire. L'eau s'infiltré jusqu'à ce que la capacité d'accumulation soit atteinte.; une fois la capacité excédée, l'eau s'écoule dans les stériles sous-jacents (Aubertin et al. 2009). Si ceux-ci sont réactifs, il pourrait y avoir contamination de l'eau traversant ces zones d'écoulement. .

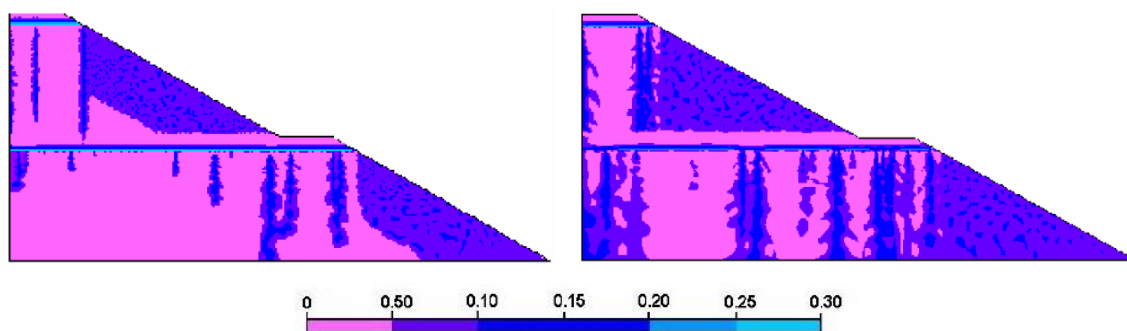


Figure 2.10 : Simulation avec des couches de sable horizontales dans une halde en gravier; à gauche, la teneur en eau après un (1) an; à droite après trois (3) ans; simulé avec HYDRUS2D (tiré de Fala et al., 2003)

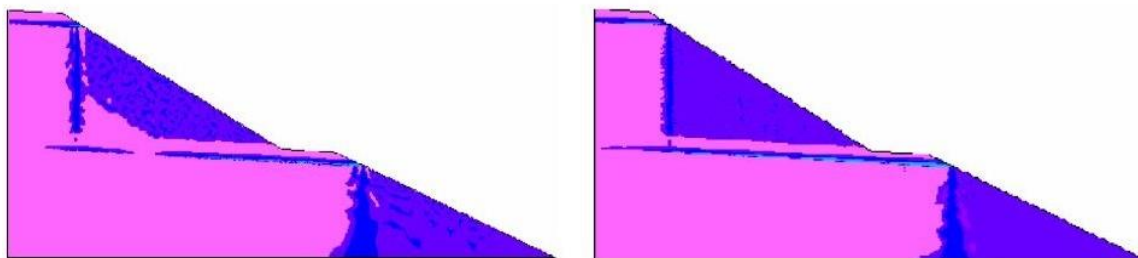


Figure 2.11 : Simulation avec des couches de sable subhorizontales inclinées à 5% dans une halde en gravier : à gauche la teneur en eau après un (1) an; à droite après trois (3) ans; simulé avec HYDRUS2D (tiré de Fala et al., 2003)

La configuration des haldes à stériles avec une couche inclinée de matériau plus fin préviendrait l'infiltration de l'eau en profondeur et dirigerait l'accumulation d'eau vers l'extérieur de la halde. L'hypothèse est que cette configuration pourrait préserver une faible teneur en eau au centre de la halde, c'est-à-dire sans écoulement. Selon cette hypothèse, l'accumulation d'eau se ferait surtout près de la limite externe de la halde (voir les zones foncé de la figure 2.11), la teneur en eau serait plus élevée à cet endroit. Avec cette configuration, une zone externe construite avec des matériaux non réactifs réduirait, le drainage de lixiviat contaminé à long terme. Ce système est plus complexe, car l'effet des couches de matériaux fins inclinées dépend des propriétés des matériaux, de l'ampleur des facteurs climatiques et hydriques, de l'épaisseur de la couche de matériaux fins, de la dimension latérale et de la forme de la halde (Aubertin et al., 2005).

Les haldes à stériles prennent plusieurs années à être construites. Pendant ce temps, la surface est exposée à plusieurs cycles de précipitations saisonniers. Une simulation sur un (1) an n'est pas suffisante pour bien évaluer le comportement des écoulements d'eau à long terme. Les haldes doivent être analysées en condition d'écoulements transitoires (Aubertin et al., 2009) afin de réduire l'effet des conditions initiales appliquées au modèle sur les analyses à long terme (Fala et al., 2011). Les simulations de Fala et al. (2006) indiquent que lorsque les mêmes cycles mensuels de recharge annuelle sont appliqués année après année, le profil de teneur en eau des matériaux devient périodique après quelques années. Selon Dawood (2011), la distribution initiale de l'eau à l'intérieur de la halde n'a pas d'effets significatifs sur les écoulements à long terme.

Les résultats de Fala et al. (2006) indiquent aussi que l'amplitude des variations des teneurs en eau dans la halde entre les saisons humides et relativement sèches est généralement faible.

Une autre approche de modélisation numérique a été présentée dans Fala et al., (2011) en utilisant des propriétés stochastiques (contiennent des variables aléatoires) pour les matériaux sulfureux. Cette approche vise à évaluer l'écoulement de l'eau et le transport géochimique dans une halde à stériles réactives pour mieux comprendre l'effet à court et à long terme de chacun des paramètres d'une halde à stériles typique. Les propriétés hydrauliques des haldes sont particulièrement importantes puisqu'elles contrôlent le degré de saturation, qui en retour affecte le comportement des écoulements d'eau et les flux d'oxygène (Fala et al., 2011). Les

simulations indiquent que la variation de la teneur en eau volumique, donc le degré de saturation des stériles, a tendance à suivre la distribution des propriétés hydrogéologiques. Le degré de saturation des stériles a une influence directe sur la géochimie de l'eau si les stériles sont réactifs. La figure 2.12 est un exemple qui présente les résultats pour le modèle stochastique horizontal. Sur cette figure, le diamètre des grains (indiqué en mètres [m]) est directement proportionnel à la teneur en eau volumique (indiqué comme le ratio du volume d'eau sur le volume des solides [-]) et à la fraction des sulfures (indiqué en fraction de sulfures [fs]). Plus le diamètre des grains est réduit, plus le matériau a une capacité de rétention d'eau élevée et plus la surface spécifique du matériau est élevée. Plus la surface spécifique est élevée plus la fraction des sulfures exposés est grande et plus le potentiel de réaction avec l'eau et l'oxygène augmente.

La distribution de l'eau n'est pas uniforme et tend à suivre la distribution des propriétés hydriques. Typiquement, les écarts-types plus élevés entre les propriétés hydriques favorisent un mouvement plus marqué le long des trajectoires préférentielles et le débit d'eau devient localisé, plus important et plus rapide (Aubertin et al., 2008; Peregoedova, 2012). Les modèles présentés à la figure 2.12 présument une recharge efficace (précipitation moins évapotranspiration) en surface et sur la pente jusqu'à la limite de division des eaux (l'axe vertical de symétrie). Il est à noter que les modèles présument un drainage libre au bas de la pente.

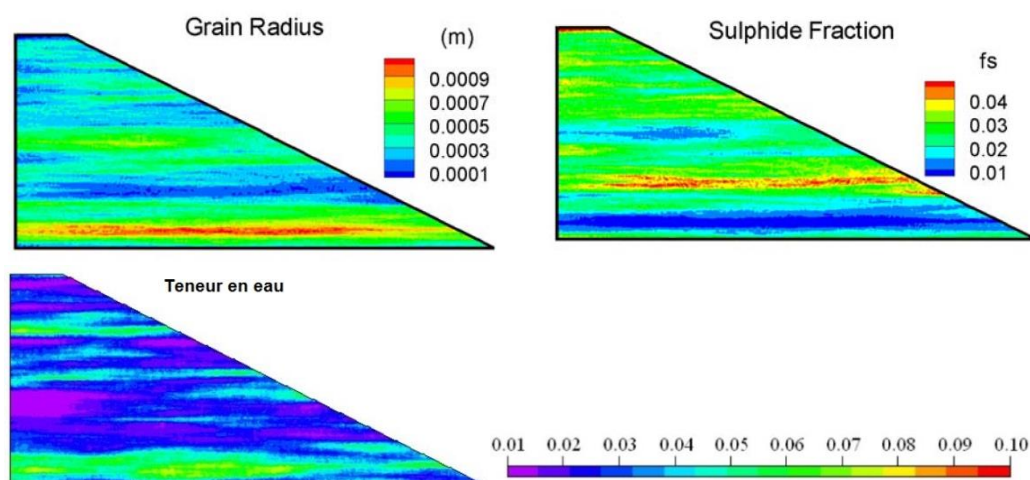


Figure 2.12 : Halde à stériles selon le modèle stochastique avec corrélation horizontale simulé avec HYDRUS2D (tirée de Fala et al., 2011).

2.6 Instrumentation

L'analyse et la conception des ouvrages d'entreposage est complexe. Ceci est dû principalement à la variété des conditions des sites, des types de matériaux et des structures ainsi que des méthodes de construction. Il est important d'évaluer à l'aide d'une instrumentation fiable les caractéristiques et les paramètres utilisés pour la conception initiale. Ensuite, il est tout aussi important de faire un suivi des conditions *in situ* et des modifications apportées tout au long de la période de construction et de durée de vie de l'ouvrage. Les méthodes d'obtention des données avec des instruments placés dans la structure sont souvent favorisées, car ils ne sont pas destructifs et fournissent des données en temps réel. Les essais traditionnels qui requièrent un échantillon sont considérés comme étant destructifs.

ICOLD (1996) (ainsi que Aubertin et al., 2002 et Rahardjo et al., 2014) fait une description détaillée des possibilités qu'offre l'instrumentation. Voici un sommaire des avantages qu'apporte l'instrumentation des ouvrages :

- Vérification du comportement des ouvrages construits en évaluant la réponse de ceux-ci en comparaison avec les conditions réelles et le design ;
- Validation de certaines hypothèses et collecte d'information requise pour modifier certains aspects de l'ouvrage en cours de route ;
- Accumulation des données afin de mieux comprendre le comportement des ouvrages et améliorer ceux-ci subséquemment ;
- Détection des anomalies, ce qui permet d'apporter les correctifs nécessaires ponctuellement, ce qui aide à assurer la stabilité physique (et physico-chimique) des ouvrages et le respect de la réglementation environnementale (Aubertin et al., 2002); et
- Vérification des résultats en utilisant la méthode numérique des éléments finis (Rahardjo et al., 2014).

Dans le cas du mode de construction des haldes à stériles et pour les essais en laboratoires décrits dans ce mémoire, les valeurs de teneur en eau volumique θ_v et succion matricielle ψ (pression négative) sont utilisées pour évaluer le comportement hydrogéotechnique du matériau de recouvrement de la halde expérimentale. Les instruments servant à déterminer la teneur en eau volumique et la succion matricielle, peuvent être combinés pour reconstituer la courbe de rétention d'eau [CRE] en fonction de la succion matricielle ψ . D'autres mesures peuvent être prises par des instruments pour le suivi du comportement de la halde telle la déformation et la stabilité, mais ceux-ci ne sont pas couverts dans cette étude. Le tableau 2.1 présente une liste sommaire des types d'instruments pouvant être utilisés pour déterminer la teneur en eau volumique θ_v ou la succion matricielle ψ d'un matériau.

Tableau 2.1 : Liste partielle des types d'instruments utilisés pour déterminer la teneur en eau ou la succion matricielle des sols (Dane et Topp, 2002; Maqsoud et al., 2007)

Teneur en eau θ_v ou w	Succion matricielle, ψ
Géoradar (Ground penetrating radar [GPR])	Tensiométrie
Réflectométrie à dimension temporelle (Time-domain reflectometry [TDR])	Micropsychromètre
Capteur de capacité	Papier-filtre
Micro-ondes	Capteur dissipation de la chaleur (Heat dissipation sensor [HDS])
Induction	Capteur de résistance électrique
Thermalisation des neutrons	Potentiomètre
Domaine des fréquences	Équitensiomètre
Gravimétrique	

Les méthodes énumérées dans le tableau 2.1 sont décrites plus en détail dans le tableau 2.2 pour les mesures de la teneur en eau volumique et dans le tableau 2.3 pour ceux mesurant la succion matricielle. Les méthodes de mesure présentées dans les tableaux 2.2 et 2.3 sont toutes des méthodes indirectes. Ces instruments mesurent des propriétés physiques ou chimiques du matériau qui permettent l'évaluation de la teneur en eau ou de la succion. Ces méthodes indirectes sont moins destructives que les méthodes directes et peuvent être utilisées pour connaître l'évolution de certaines propriétés pendant les essais ou la durée de vie de l'ouvrage.

La précision des résultats dépend fortement de la relation entre la propriété mesurée et la teneur en eau volumique ou la succion matricielle (Dane et Topp, 2002).

La mesure de la succion dans les matériaux non saturés est de plus en plus répandue et essentielle, car elle affecte les propriétés physiques des matériaux granulaires non saturés de façon directe et indirecte (Rahardjo et Leong, 2006). Présentement, il n'y a aucun instrument qui couvre la plage complète de succion dans les matériaux avec une précision convenable. Une combinaison de méthodes d'instrumentation doit souvent être utilisée pour obtenir les informations reliées à la succion dans les matériaux (Rahardjo et Leong, 2006).

À noter qu'à mesure que le matériau s'humidifie, les sondes diélectriques amplifient le signal, donc les lectures sont plus fiables (Dane et Topp, 2002). Le tableau 2.3 présente une série de méthode indirecte pour obtenir la succion matricielle dans le matériau granulaire.

Tableau 2.2 : Méthodes de mesures indirectes pouvant être utilisées pour obtenir la teneur en eau volumique (Dane et Topp, 2002)

Méthode	Nom commun ou en anglais	Paramètre mesuré	Conversion	Étalement des valeurs de mesure directe
Électromagnétique	Géoradar , ground penetrating radar (GPR)	Permittivité diélectrique volumique	Inférence de la teneur en eau volumique avec les équations de Maxwell, basé sur plusieurs présomptions	1×10^6 - 2×10^9 Hz
Électromagnétique	Réflectométrie à dimension temporelle 'Time Domain Reflectometry' (TDR)	Permittivité diélectrique volumique. Comparaison de l'impédance du matériau avec une référence standard pour estimer la teneur en eau volumique (Maqsoud et al. 2007).	Inférence de la teneur en eau volumique avec les équations de Maxwell, basé sur plusieurs présomptions. Déterminer la constante diélectrique apparente pour un matériau poreux d'après la mesure de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques le long de tiges parallèles (guides d'onde) placées dans le matériau.	5×10^7 - 5×10^9 Hz
Capteur de capacité et induction	Fréquence de la résonance	Capacitive sensors	Induction et capacitance du matériau diélectrique	4×10^7 - $1,5 \times 10^8$ Hz
Micro-ondes	Plateforme de matériau OU SARs (synthetic aperture radar) OU diffusiomètre	La force du signal micro-onde retournée à la source est proportionnelle à la constante diélectrique du matériau.	Relation avec le taux d'humidité.	0,2 - 300 GHz

Tableau 2.2 : Méthodes de mesures indirectes pouvant être utilisées pour obtenir la teneur en eau volumique (Dane et Topp, 2002)
(suite et fin)

Méthode	Nom commun ou en anglais	Paramètre mesuré	Conversion	Étalement des valeurs de mesure directe
Thermalisation de neutron, rayons gamma	NMM (humidimètre aux neutrons), nucléo densimètre	Mesure la teneur de H ⁺ de l'eau du matériau sur rayon de 0,15m à 0,5m, détermination des changements de teneurs en H ⁺ .	La concentration des neutrons thermiques autour de la source peut être reliée précisément à la teneur en eau volumique. Très précis jusqu'à 30 cm de profondeur.	Gamma : 0,30 GBq \pm 10% Neutron : 1,48 GBq \pm 10%
Domaine des fréquences	Frequency Domain (FD)	Capacité électrique du matériau.	La courbe de rétention d'eau du matériau doit être prédéterminée et ensuite une relation peut être déterminée entre la succion du capteur et la teneur en eau.	-2kPa à 1MPa
Gravimétrie	Water content	Teneur en eau	Teneur en eau versus porosité et la densité relative des grains	0 à 100%
Transmission par phase	Phase transmission (PT)	Propagation de vagues électromagnétiques à travers le matériau (Maqsoud et al. 2007).	Le déphasage est utilisé pour évaluer la teneur en eau volumique (Maqsoud et al. 2007).	
Transmission par domaine de temps	Time domain transmission (TDT)	Mesure le temps d'un pouls électromagnétique le long d'une ligne de transmission (Brisco et al. 1992).		

Tableau 2.3 : Méthodes de mesures indirectes pouvant être utilisées pour obtenir la succion matricielle (Dane et Topp, 2002)

Méthode	Nom commun ou en anglais	Paramètre mesuré	Conversion	Étalement des valeurs de mesure directe
Tensiométrie	Tensiomètre, pression transducer	Charge hydraulique d'eau dans la matrice (succion). À l'équilibre la tension d'eau dans le tensiomètre est égale à la succion dans le matériau (Singh et Kuriyan, 2003)	Voir table 3,2,2-1 (Dane et Topp, 2002)	La plus grande succion qui peut être mesurée est de 80kPa. Mesures entre 0-80kPa, max. possible 120kPa.
Tensiométrie	Osmotique	Succion matricielle	Pression positive est créée dans le tensiomètre qui est égal à la somme du Charge hydraulique osmotique et matriciel.	0 à -1500 kPa
Micropsychromètre	Thermocouple psychometry	Inférence de la charge hydraulique par l'humidité relative	Équilibre thermique et de vapeur entre le matériau et l'espace vide (Maqsoud et al. 2007).	50-3000kPa
Capteur de dissipation thermique (HDS)	Capteur de rétention capillaire, Capteur de diffusion thermique	La méthode électrothermique est basée sur l'utilisation de détecteurs de conductivité thermique qui mesurent la diffusion de chaleur dans un bloc poreux (influencée par l'eau ambiante) et la relation directe entre la teneur en eau et le taux de dissipation de chaleur (exprimé en voltage).	La courbe de rétention d'eau du matériau doit être prédéterminé et ensuite une relation peut être déterminé entre la succion du capteur et la teneur en eau.	-1MPa à 35MPa OU 10-1000kPa

Tableau 2.3 : Méthodes de mesures indirectes pouvant être utilisées pour obtenir la succion matricielle (Dane et Topp, 2002) (suite et fin)

Méthode	Nom commun ou en anglais	Paramètre mesuré	Conversion	Étalement des valeurs de mesure directe
Capteur de résistance électrique	Bloc de gypse	Conductivité électrique	La résistance électrique entre les électrodes est utilisée pour évaluer la succion. La résistance électrique à travers l'élément poreux est proportionnelle à la teneur en eau de la matrice (Maqsoud et al. 2007).	0 à -1 000 kPa
Capteur de résistance électrique	Matrice granulaire	Conductivité électrique		-10 à -200 kPa
Circuits électro-optiques	Mesure la transmission de la lumière à travers le filtre de nylon avec la teneur en eau.	La transmission d'un rayon infrarouge à travers un filtre de nylon.	Agit comme étant saturée ou non saturée. L'AEV du filtre est un indicateur de la succion plus faible que l'AEV ou plus élevée.	-0,004 MPa à -2,5 MPa
Papier-filtre	Filter paper	La masse du papier filtre après avoir atteint l'équilibre avec le sol dans un contenant scellé.	Conversion basée sur la calibration du papier filtre.	-10 à -100 000 kPa
Potentiomètre	Dew point potentiometer, WP4	Humidité relative	Équilibre entre la phase liquide et gazeuse dans l'instrument et mesurer les températures du sol et de l'air à l'équilibre..	0 à -40 000 kPa
Équitentiomètre	Time domain matric potential	Mesures de teneurs en eau	Basée sur la calibration de l'instrument entre la succion matricielle et la teneur en eau.	-2 à -1 500 kPa

Les équipements utilisés pour ce projet sont identifiées dans le tableau 2.4 et dans les descriptions subséquentes. Le tableau 2.4 présente les principales caractéristiques des instruments utilisés avec leur étalement, précision et résolution.

Tableau 2.4 : Paramètres de chacun des instruments utilisés pour les essais.

	Étalement	Précision	Résolution
EC-5 (θ)	0 à 1,0 m ³ /m ³	$\pm 0,03$ m ³ /m ³	0,001 m ³ /m ³
5-TM (θ)	0 à 0,5 m ³ /m ³	$\pm 0,03$ m ³ /m ³	0,01 à 0,02 m ³ /m ³
5-TM (T)	-40 à 60 °C	$\pm 1,0$ °C	0,1 °C
GS-3 (θ)	0 à 0,5 m ³ /m ³	$\pm 0,03$ m ³ /m ³	0,01 à 0,02 m ³ /m ³
GS-3 (T)	-40 à 60 °C	$\pm 1,0$ °C	0,1 °C
Capteur pression (h)	0 à 10 m H ₂ O	$\pm 1,0$ cm H ₂ O	0,2 cm H ₂ O
Tensiomètre (P ou ψ)	-17,2 à 17,2 kPa	$\pm 0,1$ volt/kPa	

SONDES DIÉLECTRIQUES

Les sondes diélectriques de la firme Decagon (voir figure 2.13) ont été utilisées pour mesurer la teneur en eau volumique lors de plusieurs essais. Les sondes utilisées sont les EC-5, 5TM et GS3. Une description détaillée de la procédure d'utilisation et de calibration des sondes est fournie à la section 4.1 (et à l'annexe C1). Le positionnement des sondes ainsi que la méthode d'accumulation des données y sont aussi décrits.

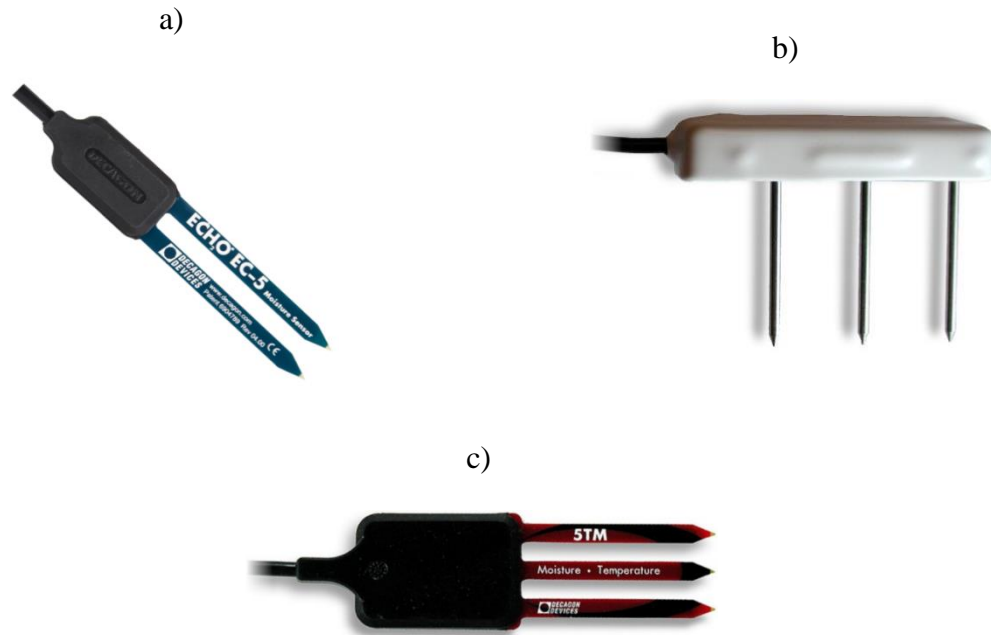


Figure 2.13 : Sondes diélectriques a) Echo Ec-5, b) GS-3 et c) 5TM (tiré de www.decagon.com)

CAPTEURS DE PRESSION

Les capteurs de pression permettent de mesurer la pression atmosphérique ou la charge d'eau. Pour les essais en cuves et en colonnes, les Micro-Diver (DI 601-10) de la firme Schlumberger ont été utilisées (voir figure 2.14). Les spécifications et calibrations des sondes sont disponibles à l'annexe C2.

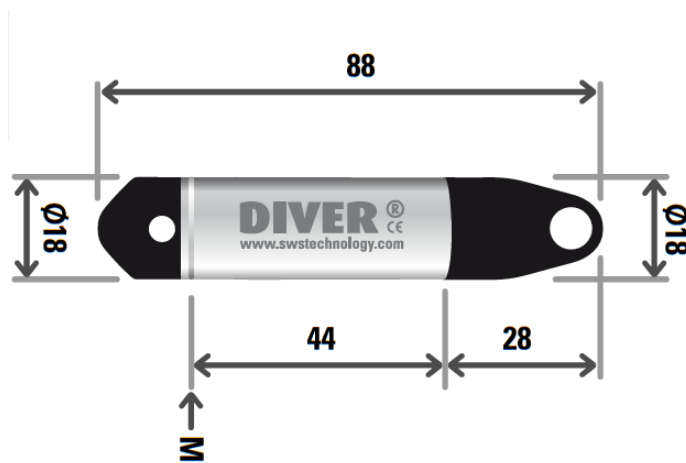


Figure 2.14 : Capteur de pression Diver DI 601 utilisée dans la colonne d'eau de 10 m (Schlumberger Water Services)

TENSIOMÈTRES

Les tensiomètres sont utilisés pour mesurer la succion par équilibre de la pression intérieure avec l'extérieur par une céramique poreuse. Les tensiomètres doivent être calibrés pour des pressions positives et négatives. Il est préférable de relier ceux-ci à un logiciel d'enregistrement des données. Dans le cadre des essais présentés dans ce mémoire, le logiciel LabView a été utilisé pour enregistrer les données.

Les tensiomètres utilisés pour les essais en colonnes peuvent mesurer un étalement de la pression de ± 35 kPa à 0-3500 kPa de la marque OMÉGA (voir figure 2.15). La calibration a été faite à l'aide de burettes. De l'eau désaérée a été insérée dans les tubes et les mesures des tensiomètres ont été prises à différentes charges. Ensuite, une équation linéaire a été élaborée pour chacune des sondes en fonction de la charge réelle et la valeur obtenue avec le tensiomètre. Les données et formules de calibration sont présentées à l'annexe C3.

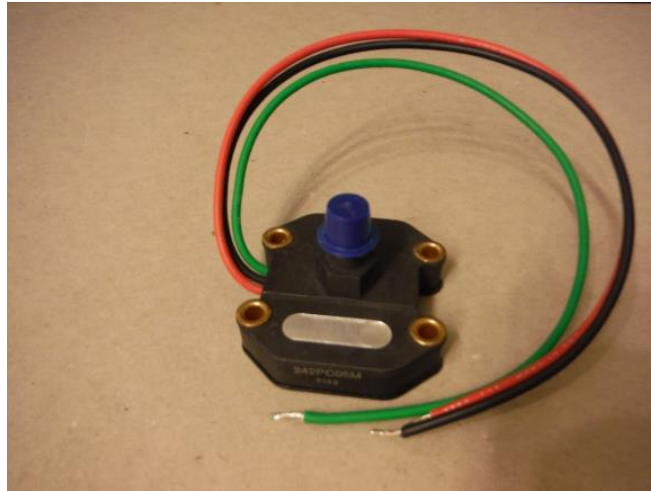


Figure 2.15 : Exemple de tensiomètre OMEGA PX240.

Les tensiomètres sont souvent utilisés, car ils sont simples et relativement peu coûteux. Ils peuvent permettre une mesure en continu et répondent assez rapidement aux changements de la succion matricielle dans le matériau. Ils ont aussi l'avantage de mesurer la pression dans les zones saturées et non saturées. Les désavantages liés à leur utilisation incluent leur sensibilité au gel, une installation difficile à grande profondeur et une efficacité très réduite au-delà de -85 kPa environ (Rahardjo & Leong, 2006).

CHAPITRE 3 CARACTÉRISATION PRÉLIMINAIRE DES MATÉRIAUX

Les roches stériles sont des matériaux complexes en raison de leur provenance et de leur manipulation. Comme décrit au chapitre 2, les roches stériles sont typiquement hétérogènes (composition variée) en minéralogie et en distribution granulométrique. Elles ont un coefficient d'uniformité [$C_u = D_{10}/D_{60}$] élevé et les particules sont angulaires. L'étalement granulométrique des roches stériles peut entraîner l'instabilité de la structure interne par la migration des particules fines dans la matrice (Aubertin et al. 2008; Peregoedova, 2012).

Les roches stériles proviennent généralement de masses rocheuses dynamitées. Selon la nature géologique des roches et les paramètres de dynamitage, leur propriétés et caractéristiques peuvent varier significativement d'un site à l'autre et même à l'intérieur d'un même site (Morin et al. 1991). Cette variabilité des propriétés et des caractéristiques nécessite que la caractérisation des roches stériles soit effectuée pour chaque type de matériau identifié (Aubertin et al., 2005). De plus, comme décrit au chapitre 2, la méthode de minage (en souterrain ou à ciel ouvert) d'entreposage des roches stériles a aussi un effet important sur le comportement des roches stériles dans les haldes (Morin et al. 1991).

L'approche préconisée par Aubertin et al. (2005), est d'effectuer une caractérisation en utilisant des mesures directes, des essais de laboratoire et des essais *in situ*, tout en faisant le suivi du matériau en place avec des mesures indirectes. Les résultats des essais et du suivi du comportement peuvent être combinés aux modèles numériques et aux prédictions (Aubertin et al., 2005, 2008; Bussière et al., 2011). Les modélisations numériques permettent de mieux comprendre et d'estimer le comportement des haldes à stériles lorsque soumises à une variété de conditions sur le terrain (Aubertin et al., 2002; Fala et al., 2003, 2005, 2006, 2008; Molson et al., 2005; Dawood et al., 2011, 2012).

3.1 Généralités sur la méthodologie expérimentale

La caractérisation des matériaux miniers peut inclure : la nature géologique, les propriétés hydrogéotechniques et le comportement géochimique. Les mesures des propriétés sont

souvent basées sur des normes ou méthodes comme c'est le cas pour la distribution granulométrique (ASTM D422), la forme des grains (Krumblein et Sloss, 1963), la conductivité hydraulique (ASTM D2434) et la densité relative des grains (ASTM D854).

Les essais en laboratoire et sur le terrain peuvent inclure des essais standards ou des essais décrits dans la littérature scientifique. Ils peuvent aussi être originaux afin d'évaluer le comportement du matériau en place en fonction des conditions appliquées. Suite à la caractérisation et le suivi du comportement du matériau, un modèle numérique peut être développé et calibré afin de représenter les conditions *in situ* (Aubertin et al., 2005). La modélisation numérique peut aider à extrapoler le comportement et les caractéristiques du matériau sous différentes conditions afin d'évaluer le comportement du matériau dans une halde à stériles, c'est-à-dire à l'échelle de terrain.

Dans cette étude des essais originaux ont été élaborés. Une grande cuve a été utilisée pour évaluer le comportement des roches stériles sous différentes conditions de compactage durant l'infiltration d'eau. La méthode préconisée pour les essais en cuve a été élaborée à partir des essais originaux effectuée par Monica Monzon, à l'École Polytechnique de Montréal (non publié). Le protocole expérimental est présenté au chapitre 4 de ce mémoire; il décrit la mise en place et le compactage du matériau de manière contrôlée et uniforme, les modalités appliquées pour mener les essais d'infiltration et les techniques de suivi des conditions pendant l'essai, au montage et au démontage.

Divers protocoles d'essais de laboratoire ont été développés pour étudier le comportement hydrogéologique des roches stériles. Par exemple, Peregoedova (2012) et Monzon (communication personnelle) ont réalisé plusieurs essais de laboratoire à l'échelle intermédiaire avec des roches stériles et du sable afin de caractériser leur comportement hydrique et pour calibrer les modèles prédictifs existants en fonction de leurs particularités. Les essais originaux de Peregoedova (2012) ont été développés et inspirés par ceux menés par Hernandez (2007) et Chapuis et al. (2007). Les caractéristiques hydrogéologiques des roches stériles utilisées pour les essais présentés dans ce mémoire ont aussi été évaluées à l'aide d'essais en colonne. Ces essais ont permis d'évaluer la courbe de rétention d'eau des roches stériles et leur conductivité hydraulique saturée. Le protocole expérimental des essais en colonne est présenté au chapitre 4 brièvement et à l'annexe D en détails. Il décrit la

démarche de montage des colonnes, les modalités des essais de perméabilité et de drainage effectuées, et les techniques de suivi des conditions pendant les essais.

3.2 Matériau étudié

La présente étude porte sur la réalisation d'essais en laboratoire sur un échantillon de roches stériles composées principalement d'anorthosite qui ont été tamisées à la mine pour obtenir un diamètre maximum des grains de 10 mm. L'échantillon provient de la mine du Lac Tio appartenant à la compagnie minière Rio Tinto Fer et Titane [RTFT]. La mine du Lac Tio (coordonnées géodésiques approximatives : $50^{\circ}33'25.51''\text{N}$ $63^{\circ}24'50.05''\text{O}$) est située à 43 km au nord-est de la ville d'Havre-Saint-Pierre sur la Côte-Nord au Québec (voir figure 3.1).

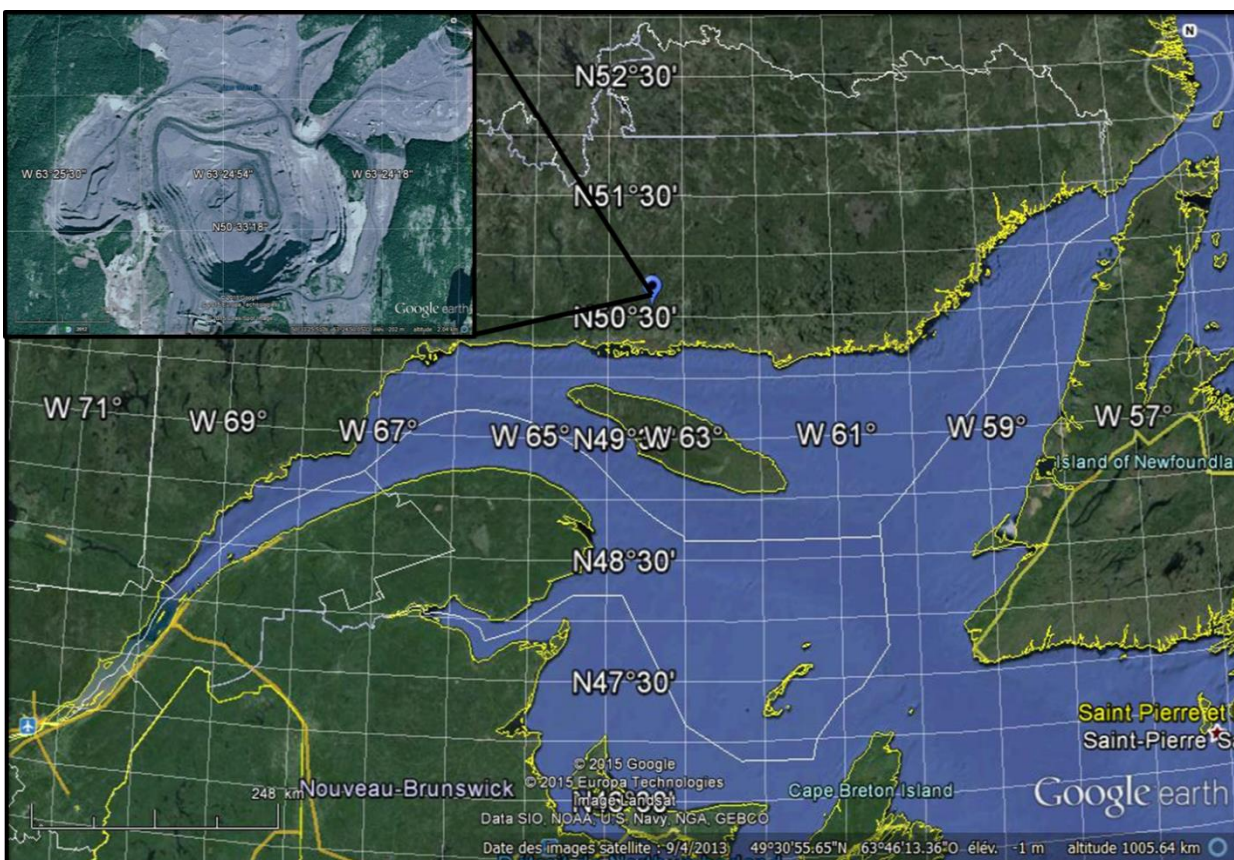


Figure 3.1 : Localisation de la mine du Lac Tio située à 43 km au nord de la ville de Havre-Saint-Pierre dans la région de la Côte-Nord du Québec (tiré de Google Earth 2015-04-21).

L'échantillon a été reçu à l'été 2013 au laboratoire de l'Institut de Recherche en Mines et Environnement [IRME] de l'École Polytechnique de Montréal. L'échantillon a été reçu dans un baril contenant environ 350 kg de roches stériles (masse sèche) tamisées à moins de 10 mm de diamètre au site de la mine du Lac Tio préalablement à l'envoi. Les roches stériles sur la halde ont une distribution granulométrique beaucoup plus étalée avec des blocs allant jusqu'à un (1) mètre de diamètre (Lessard, 2011).

3.2.1 Composition minéralogique

La roche stérile, formée surtout d'anorthosite, est composée principalement d'anorthite et d'anorthoclase. La composition chimique de ces deux minéraux peut être exprimée comme suit (Klein et Hurlbut (1937-1999)) :

- Anorthite : $(\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{A}_{n90}-\text{A}_{n100}))$; densité relative 2,76
- Anorthoclase : $((\text{K},\text{Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8 - \text{Sanidine})$; densité relative 2,58

Des analyses minéralogiques semi-quantitatives par diffraction des rayons X [DRX] ont été effectuées à l'UQAT (par Hassan Bouzahzah de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue). Ces essais au DRX révèlent que la portion des stériles ayant sédimentés suite aux essais de drainage est composée principalement de labradorite (30% à 50%) et d'andesine (10% à 16%), avec de la chlorite (12% à 15%) et l'albite (9% à 14%), et des traces de quartz, calcite et augite. Les résultats détaillés des essais effectués par DRX sont présentés à l'annexe F. Une analyse complète par essais cinétiques sur les roches stériles de la Mine Tio est décrite dans Plante (2011).

3.3 Protocoles des essais standardisés

Plusieurs essais normalisés ont été exécutés pour caractériser le matériau étudiés. Ces essais incluent la distribution granulométrique (section 3.3.1), la densité relative des grains (section 3.3.2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), la conductivité hydraulique saturée (section

3.3.4), le poids volumique sec selon l'essai de compactage Proctor standard et modifié (section 3.3.5) et, la forme des grains selon l'indice de rondeté et sphéricité (section 3.3.3).

3.3.1 Distribution granulométrique

L'analyse de la distribution granulométrique vise à déterminer la taille des particules selon les pourcentages pour chaque fraction. La norme ASTM D422 a été utilisée pour faire ces analyses. La courbe de distribution granulométrique présentée ici est représentative de l'échantillon complet du baril de roches stériles reçu à l'été 2013.

Le tamisage s'est fait en plusieurs étapes dû à la grande quantité de matériau à étudier. En premier lieu un tamisage avec des gros tamis mécaniques ayant des ouvertures de 9,5 mm, 5,0 mm et 2,5 mm a été fait. Les gros tamis ont une capacité approximative de 12 kg par tamisage de 10 minutes. Ensuite, la portion retenue sous le tamis avec une ouverture à 2,5 mm a été tamisée avec des petits tamis avec les ouvertures suivantes : 2,5 mm, 1,25 mm, 0,63 mm, 0,315 mm, 0,160 mm, 0,08 mm, et une assiette. Les petits tamis ont une capacité approximative de 1 à 2 kg, pour un tamisage mécanique de 20 minutes. Une portion représentative du matériau passant le tamis 80 μm a été analysée avec trois essais de sédimentométrie. Les modifications aux calculs pour tenir compte de la portion plus grande que 80 μm tel que décrit dans la norme ASTM D422 n'ont pas été effectuées puisque l'analyse était exécutée à une portion plus petite que 80 μm (points 11 et 12 de la norme).

La courbe de distribution granulométrique pour l'échantillon complet de roches stériles d'anorthosite est présentée à la figure 3.2. Cette figure inclut aussi un tableau des valeurs caractéristiques de la distribution granulométrique tel que le coefficient d'uniformité, le coefficient de courbure, la surface spécifique et le diamètre des grains pour le pourcentage de particules passant à 5%, 10%, 30%, 50% et 60%.

Quelques paramètres ont été évalués en relation avec la courbe granulométrique (voir figure 3.2) soit le coefficient d'uniformité C_u et le coefficient de courbure à partir des équations suivantes (e.g. : Kalinski, 2006).

$$C_U = D_{60}/D_{10} \quad (3-1)$$

$$C_c = (D_{30})^2/(D_{60} * D_{10}) \quad (3-2)$$

Où :

D_{10} : diamètre des particules correspondant à 10% passant [L]

D_{30} : diamètre des particules correspondant à 30% passant [L]

D_{60} : diamètre des particules correspondant 60% passant [L]

Le coefficient d'uniformité (C_u) représente l'étalement granulométrique des particules. Les stériles de cette étude ont un coefficient d'uniformité moyen de 17,9; ils ont donc une granulométrie très étalée, comme c'est usuellement le cas (Aubertin et al., 2002a).

Le coefficient de courbure ou de concavité (C_c) est une caractéristique de la forme de la distribution granulométrique entre le D_{10} et le D_{60} ; sa valeur est de 0,86 pour les roches stériles utilisées dans cette étude. Lorsque la distribution granulométrique est linéaire ou convexe vers le bas, C_c se situe usuellement entre 1 et 3; les roches stériles utilisées pour cette étude ont une courbe granulométrique relativement régulière.

La surface spécifique (S_s) a été calculée selon l'équation de Chapuis et Légaré (1992), présentée ici-bas. L'équation 3-3 est utilisée dans le modèle prédictif de la conductivité hydraulique saturée de Kozeny-Carman (Chapuis et Aubertin, 2003)

$$S_s \text{ (m}^2\text{/kg)} = \alpha / \rho_s * \Sigma(P_{NoD} - P_{Nod}) / d \quad (3-3)$$

Où

S_s : surface spécifique

α : facteur de forme ($\alpha \approx 6$, parfaitement sphérique) [-]

ρ_s : masse volumique sèche des grains solides [kg/m³]

Les particules plus petites que le diamètre minimal obtenu par les analyses granulométriques ont été calculées avec la formule du diamètre équivalent (Chapuis et Légaré, 1992).

$$d_{eq} = \sqrt{[(D_{min})^2/3]} \quad (3-4)$$

Où :

d_{eq} : diamètre équivalent des grains [m]

D_{min} : diamètre minimal mesuré [m]

Les courbes granulométriques obtenues pour la roche stérile tamisée (à 0-10 mm) montrent la taille des grains est très étalée. Selon le système unifié de classification des sols (USCS), les roches stériles tamisées seraient classifiées comme étant un sable angulaire (SW-SM) étalé contenant des traces de silt (voir figure 3.2).

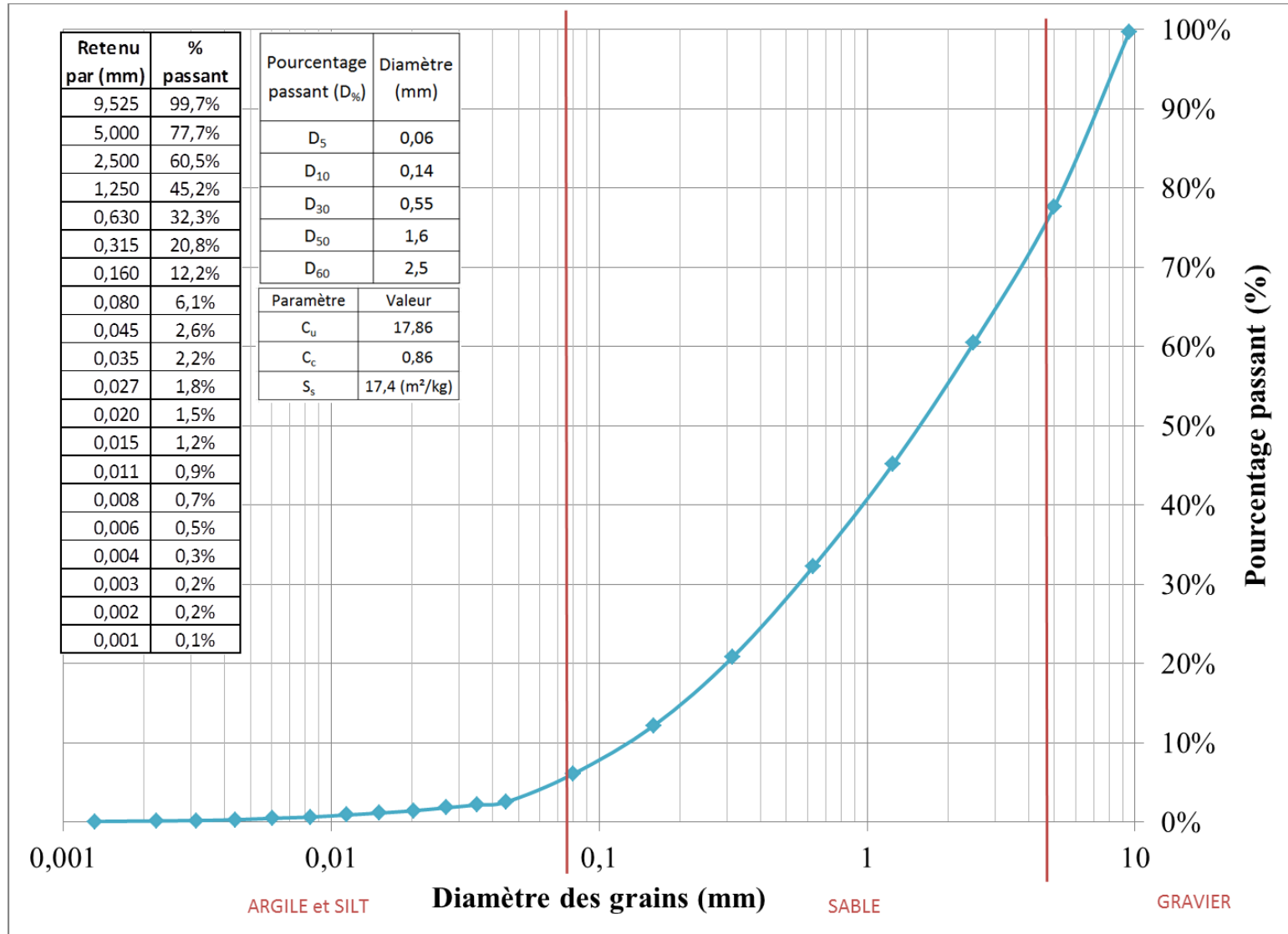


Figure 3.2 : Distribution granulométrique représentative de l'échantillon de roches stériles.

Pour certains essais, lorsque l'échantillon était trop volumineux, l'échantillonnage d'un spécimen représentatif a été fait en utilisant un séparateur de matériaux granulaires (voir figure 3.3) afin de diviser uniformément le matériau en deux parties équivalentes représentatives de l'échantillon complet. Ceci a été effectué pour les échantillons provenant du montage et démontage des essais avant de faire les tests de caractérisation normalisés.



Figure 3.3 : Séparateur de matériaux type (source : <http://www.humboldtmfg.com/>)

Suite aux essais d'infiltration et de drainage en cuve (décrits à la section 4.2), l'échantillon de roches stériles a été tamisé pour déterminer la courbe de distribution granulométrique. Suite à la séparation des diverses fractions de l'échantillon (pour déterminer la courbe de distribution granulométrique), les essais en colonne ont été faits sur des échantillons de roches stériles reconstitués pour respecter la courbe granulométrique (voir figure 3.2). Lors de la reconstitution d'échantillons représentatifs, le séparateur (figure 3.3) a été utilisé pour homogénéiser le matériau. La reconstitution consiste à combiner les fractions de granulométrie selon la masse voulue. Un exemple pour un échantillon reconstitué d'une masse de 45 kg est présenté au tableau 3.1; la distribution granulométrique de roches stériles (voir section 3.3.1) est présentée pour chacun des tamis utilisé pour le pourcentage passant et retenu. Ensuite, le calcul de la masse requise ciblée pour chacune des fractions de tamis est présenté pour un échantillon total de 45 kg au tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Exemple de la masse requise pour chacune des fractions granulométriques pour la reconstitution de la distribution granulométrique d'un échantillon de 45 kg.

Retenu par (mm)	% passant	% retenu	Masse (kg)
9,525	99,7%	0,3%	0,12
5	77,7%	22,0%	9,92
2,5	60,5%	17,2%	7,75
1,25	45,2%	15,3%	6,87
0,63	32,3%	12,9%	5,82
0,315	20,8%	11,4%	5,14
0,16	12,2%	8,7%	3,89
0,08	6,1%	6,1%	2,75
<0,08	6,1%	6,1%	2,74

3.3.2 Densité relative des grains

La densité relative, D_r , a été déterminée par la méthode du pycnomètre selon la norme ASTM D854. La densité relative (aussi appelée gravité spécifique) est basée sur trois mesures selon l'équation suivante (e.g. : Kalinski, 2009) :

$$D_r = \frac{M_s}{M_s + (M_a - M_b)} \quad (3-5)$$

Où :

M_a : masse du pycnomètre remplis d'eau distillée désaérée, [M]

M_b : masse du pycnomètre remplis d'eau et de matériau, [M]

M_s : Masse du matériau sec, [M]

La densité des grains solides [D_r] peut varier entre 2,6 et 4,0 ou plus pour les rejets d'opérations minières en roches dures comme, c'est le cas à la mine du Lac Tio (Aubertin et

al. 2002a). Puisque la densité de l'eau est dépendante de la température, une correction doit être appliquée pour obtenir la D_r à 20°C. La procédure ASTM D854 contient le facteur de correction à utiliser pour les températures de 15°C à 30°C.

Comme vue précédemment à la section 3.2.1, les densités relatives des minéraux composants l'anorthosite sont de 2,76 et 2,58 (pour l'anorthite et l'anorthoclase), respectivement. La densité relative moyenne corrigée à 20°C pour les roches stériles étudiées dans le cadre de cette recherche, basée sur trois essais, est de 2,747 avec un écart type de 0,012.

3.3.3 Indice des vides prédits et mesurés

En complément aux essais en cuve, on a voulu estimer les valeurs minimale et maximale de l'indice des vides selon la relation suivante proposée par Chapuis (2012) :

$$\frac{1}{e_{max}} = [-0.1457RF^3 - 1.3857RF^2 + 1.9933RF - 0.0931] \ln(C_u) + [4.3209RF^3 - 8.6685RF^2 + 5.9588RF - 0.1552] \quad (3-6)$$

$$\frac{1}{e_{min}} = [7.9767RF^3 - 14.623RF^2 + 8.8518RF - 0.721] \ln(C_u) + [21.319RF^3 - 32.949RF^2 + 17.206RF - 1.0033] \quad (3-7)$$

Cette estimation, permet entre autre, de s'assurer que les valeurs utilisées lors des prédictions et obtenues lors des essais sont valides. L'indice de rondeté (RF-roundness factor défini à la figure 2.5) est de l'ordre de 0,31 selon les résultats montrés à la figure 3.4. Un échantillon de près de 100 grains de roches stériles d'anorthosite tamisée a été utilisé pour faire l'évaluation de l'indice de rondeté (voir annexe H). L'indice des vides minimum et maximum se situerait alors entre 0,23 -et 0,47, respectivement, pour les roches stériles tamisées. L'indice des vides minimal obtenu des essais de compactage Proctor standard et modifié (ASTM D698-12 et D1557-07) est de 0,26 et 0,31. L'indice des vides pour les essais en colonne varie entre 0,25 et 0,40. Pour les essais en cuve, les valeurs de l'indice des vides varient entre 0,32 et 0,54. Les

valeurs élevées de l'indice des vides au-dessus de l'estimation faite avec l'équation 3-6 provient du montage M1. Dans ce montage tous les câbles reliant les sondes diélectriques au système d'acquisition des données ont été placés ensemble ce qui a créé une faiblesse dans le matériau et des écoulements préférentiels. Les résultats pour les essais du Montage M1 sont tout de même présentés, mais doivent être revus avec précaution. Pour les montages M2 et M3 les câbles ont été dispersés à travers la cuve afin de diminuer leur influence sur les résultats.

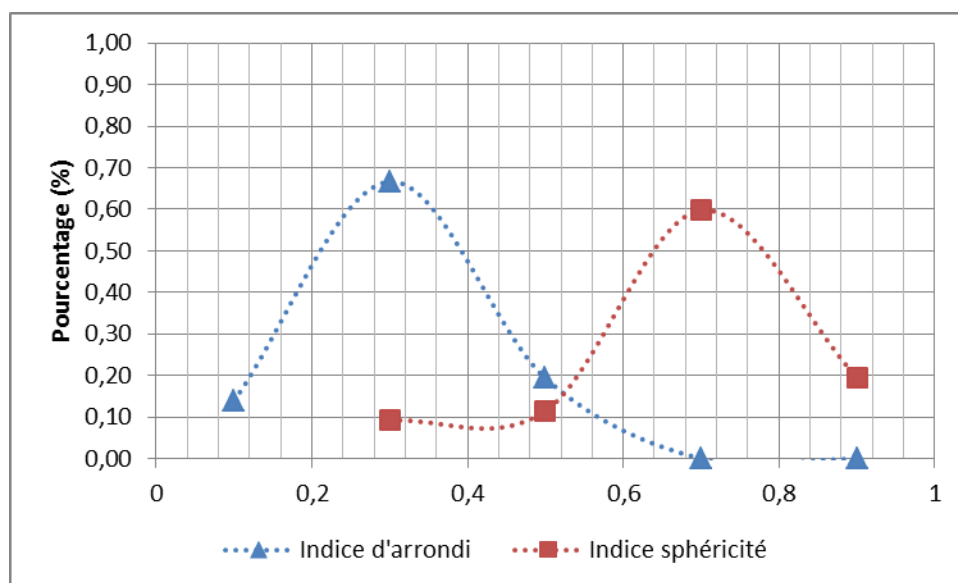


Figure 3.4 : Résultat de l'évaluation visuelle des indices d'arrondi et de sphéricité de la roche stérile tamisée (selon l'approche de Krumbein et al. 1963).

3.3.4 Conductivité hydraulique saturée

Des essais de perméabilité avec un perméamètre à parois rigide ont été effectués en suivant la norme ASTM D2434 à charge constante et à charge variable. La granulométrie des roches stériles a nécessité l'utilisation d'un perméamètre de plus de 114 mm de diamètre comme décrit dans la norme (ASTM D2434) afin d'obtenir un essai représentatif. Le diamètre du perméamètre utilisé était de 14,35 cm. Quelques ajustements ont été faits sur le montage pour effectuer les essais à charge constante et variable avec le même perméamètre (ASTM D2434).

Les essais à charge variable sont plus simples, car il n'y a pas à maintenir une charge constante dans le réservoir source et le débit à l'effluent n'a pas besoin d'être enregistré.

L'interprétation des mesures est basée sur la loi de Darcy (section 2.2). Afin de saturer l'échantillon, le vide est appliqué dans le perméamètre. L'eau distillée et désaérée est ajoutée par le bas de la colonne (Chapuis et al. 1989). La masse du perméamètre avec et sans eau est enregistrée, et les calculs du degré de saturation permettent de s'assurer que l'échantillon est près de $S_r = 100\%$ avant de débiter les essais.

ESSAIS À CHARGE CONSTANTE

Les essais à charge constante ont été effectués selon la norme ASTM D2434. Les équations suivantes, tirées de Kalinski (2009), sont utilisées pour obtenir la conductivité hydraulique saturée [k_{sat}].

$$k_{sat} = \frac{QL_c}{\Delta h A t} \quad (3-8)$$

Où :

L_c : la distance entre les deux manomètres [L]

D : Diamètre de l'échantillon de matériau dans le perméamètre [L]

A : aire de l'échantillon [L²]

Δh : variation de la charge hydraulique entre les deux manomètres [L]

t : temps écoulé pour le changement de charge Δh [T]

ESSAIS À CHARGE VARIABLE

Suite à l'essai à charge constante, le même échantillon a été utilisé pour effectuer un essai à charge variable. Le réservoir d'eau avec une charge initiale (H_i) se draine en passant par le perméamètre. On enregistre la charge d'eau dans le réservoir, au début (H_i) et à plusieurs

intervalles (H_n) de temps (t_n) pendant l'essai, et la charge d'eau finale à la fin de l'essai (H_f). La conductivité hydraulique est obtenue selon (Kalinski, 2009):

$$k_{sat} = \frac{aL_c}{At_n} \ln\left(\frac{H_i}{H_n}\right) \quad (3-9)$$

Où :

a : aire du réservoir d'eau [L²]

H_i : charge initiale [L]

H_n : charge au temps n [L]

t_n : temps écoulé n [T]

RÉSULTATS DES ESSAIS DE PERMÉABILITÉ

Un sommaire des résultats obtenus des essais de perméabilité avec perméamètre à parois rigides est présenté au tableau 3.2. Certains essais de perméabilité ont été effectués par des étudiants stagiaires du baccalauréat en génie minéral sous la supervision de Noura El-Harrak (Patrick Gagnon, Ramah Pydiah, Eugene Rus, Jérôme Goyer, Stéphanie Letourneux et Michelle Caron). Certains résultats d'essais ne sont pas présentés ici, car les données montrent des erreurs, ils sont tout de même présentés à l'annexe J. Les essais de perméabilité effectués par la technicienne de laboratoire (Noura El-Harrak, technicienne) sont présentés ici.

Tableau 3.2 : Résultats des essais au perméamètre à parois rigides selon la norme ASTM D2434 pour des essais à charge constante et variable : roches stériles anorthosite 0-10 mm.

Type d'essai	Gradient moyen	Degré de saturation initial	Conductivité hydraulique moyenne à 20°C	Conductivité hydraulique saturée corrigée selon Mualem (1976)	Indice des vides
	<i>i</i>	%	k₂₀	k_{sat}	<i>e</i>
			cm/s	cm/s	
Variable (2014-01-24)	5,14	96	8,7E-03	9,7E-03	0,32
Constante (2014-01-24)	1,52	97	4,1E-03	4,5E-03	0,32
Constante (2014-01-24)	1,65	97	4,1E-03	4,5E-03	0,32
Constante (2014-07-23)	2,03	91	4,6E-03	6,0E-03	0,39
Constante (2014-07-23)	1,73	91	4,6E-03	6,1E-03	0,39
Constante (2014-07-23)	1,81	80	3,5E-04	6,8E-04	0,38
Constante (2014-07-23)	1,81	80	2,9E-04	5,7E-04	0,38
Constante (2014-07-31)	1,74	81	2,8E-04	5,2E-04	0,38
Variable (2014-07-24)	2,21	80	1,1E-02	2,1E-02	0,38
Variable (2014-07-24)	2,31	80	1,8E-02	3,5E-02	0,38
Moyenne	2,19	87	5,6E-03	8,9E-03	0,36
Prédiction	KCM : Mbonimpa et al. 2002		2,0E-03		0,35
Prédiction	KC : Chapuis et Aubertin 2003		2,8E-03		0,35
Mesuré	Peregoedova 2012 : 0-50 mm roches stériles ilmenite		1,3E-01		0,35
Estimé	Lessard 2011 : Terrain halde à stériles		5,0E-03		0,35

Les conductivités hydrauliques mesurées ont été converties aux valeurs correspondantes pour 20°C selon la densité de l'eau, en utilisant le facteur R_T fournit dans la norme ASTM D2434. Les équations suivantes, tirées de Chapuis et al. (1989) ont aussi été appliquées pour obtenir la conductivité hydraulique saturée.

$$k_{20} = k \times R_T \text{ (ASTM D2434)} \quad (3-10)$$

$$M_{ms} = M_{tot} - (M_e - V\rho_w) \text{ (Chapuis et al. 1989)} \quad (3-11)$$

$$k_{sat} = \frac{k_{20}(1-S_o)^\delta}{(S_r-S_o)^\delta} \text{ (Mualem, 1976)} \quad (3-12)$$

Où l'équation 3-12 permet de corriger la valeur pour un degré de saturation inférieur à 100%; avec :

k : la conductivité hydraulique calculée pour les essais [L/T]

k_{20} : la conductivité hydraulique, k , converti pour une température de l'eau à 20°C [L/T]

δ : valeur suggérée $\delta = 3$ (voir tableau 7.1 de Fredlund et al., 2012, valeur de Irmay, 1954)

M_{ms} : masse du matériau humide [M]

M_{tot} : Masse totale du perméamètre avec matériau, eau et air [M]

M_e : masse du perméamètre rempli avec de l'eau désaérée [M]

V : volume de l'échantillon de matériau [L³]

R_T : ratio de viscosité à la température absolue de 20°C

S_o : Degré de saturation à teneur en eau résiduelle [-]

3.3.5 Poids volumique sec compacté

Le poids volumique sec compacté du matériau a été évalué selon les méthodes normalisées ASTM D698 et D1557 utilisant l'essai Proctor standard et modifié, respectivement. Ce qui différencie ces essais est l'énergie de compactage appliquée sur le matériau. Les deux essais Proctor utilisent les mêmes relations pour les calculs. La figure 3.5 présente la courbe du poids volumique sec ρ_d en fonction de la teneur en eau w ainsi que la ligne de saturation à $S_r = 80\%$ et 100% pour chaque méthode. Le poids volumique sec maximal γ_{d-max} est de 21,28 kN/m³ pour l'essai Proctor standard avec une teneur en eau massique w de 6,5% ,et de 22,08 kN/m³ pour le Proctor modifié avec une teneur en eau massique de 6,9%. Les résultats

détaillés sont présentés à l'annexe G. Les équations principales utilisées pour ces essais sont (Kalinski, 2009) :

$$\rho_d = \frac{M_t - M_{md}}{V_m(1 + w/100)} \quad (3-13)$$

$$\gamma_D = \rho_d g = \frac{D_r \gamma_w}{1 + w D_r} \quad (3-14)$$

Où :

M_t : Masse du matériau humide dans le moule avec le moule, [M]

M_{md} : Masse du moule de compactage, [M]

M : Masse nette de l'échantillon compacté, [M]

γ_d : Poids unitaire sec, [M/L²T]

V_m : Volume moule, [L³]

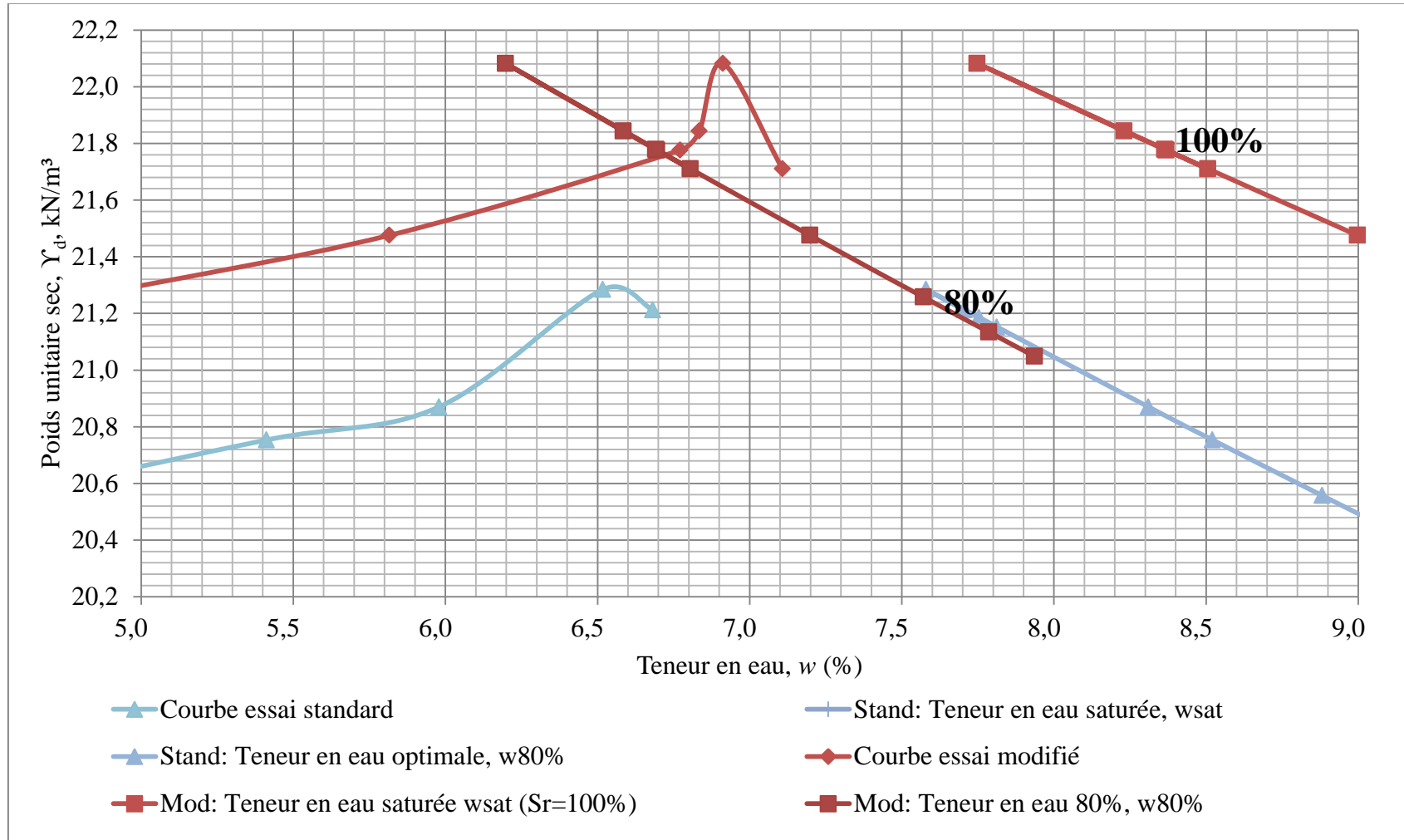


Figure 3.5 : Résultat des essais de compactage Proctor standard et modifié (ASTM D698 et ASTM D1557, méthode B), sur les roches stériles

3.3.6 Caractérisation et prédiction des propriétés hydrogéologiques

Des méthodes de prédiction des propriétés hydrogéologiques des matériaux ont été proposées par plusieurs auteurs, comme décrit au chapitre 2, afin d'estimer la courbe de rétention d'eau et la conductivité hydraulique des matériaux.

Les prédictions et les mesures en laboratoire et sur le terrain de la conductivité hydraulique saturée des roches stériles utilisées sont présentées dans le tableau 3.3 et à la figure 3.6 selon les modèles de KCM (Mbonimpa et al., 2002) et KC (Chapuis et Aubertin, 2003). Les prédictions sont basées sur les granulométries présentées à la section 3.3.1. Ces méthodes de prédiction sont présentées à la section 2.2.5.1. Les données expérimentales pour les essais faits par Peregoedova (2012) et Lessard (2011) sont aussi présentées à titre comparatif. Les essais de Peregoedova ont été faits avec des roches stériles provenant de la Mine du Lac Tio d'une distribution granulométrique variable avec un diamètre variant entre 0 et 50 mm et composé majoritairement d'ilmenite. Les essais faits par Lessard (2011) ont été faits sur la halde à stériles de Petit-Pas de la Mine du Lac Tio (voir tableau 3.3). Une comparaison plus détaillée entre les prédictions et les données expérimentales sera présentée à la section 5.2.

Tableau 3.3 : Valeurs de la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) mesurées et prédites

Porosité, n (%)	Indice des vides, e (-)	KCM: Mbonimpa et al. 2002 (0-10 mm) (cm/s)	KC: Chapuis et Aubertin 2003 (0-10 mm) (cm/s)	Mesuré: Peregoedova, 2012 (pour 0-50 mm) Ilmenite (cm/s)	Estimation: Lessard, 2011 (pour 0-300 mm) Anorthosite (cm/s)
26%	0,35	2,0E-03	2,8E-03	1,3E-01	5,0E-03
30%	0,43	5,1E-03	4,8E-03	6,9E-02	4,0E-03
33%	0,49	9,7E-03	7,0E-03	1,5E-02	3,0E-02
37%	0,59	2,2E-02	1,1E-02	S.O.	3,0E-01

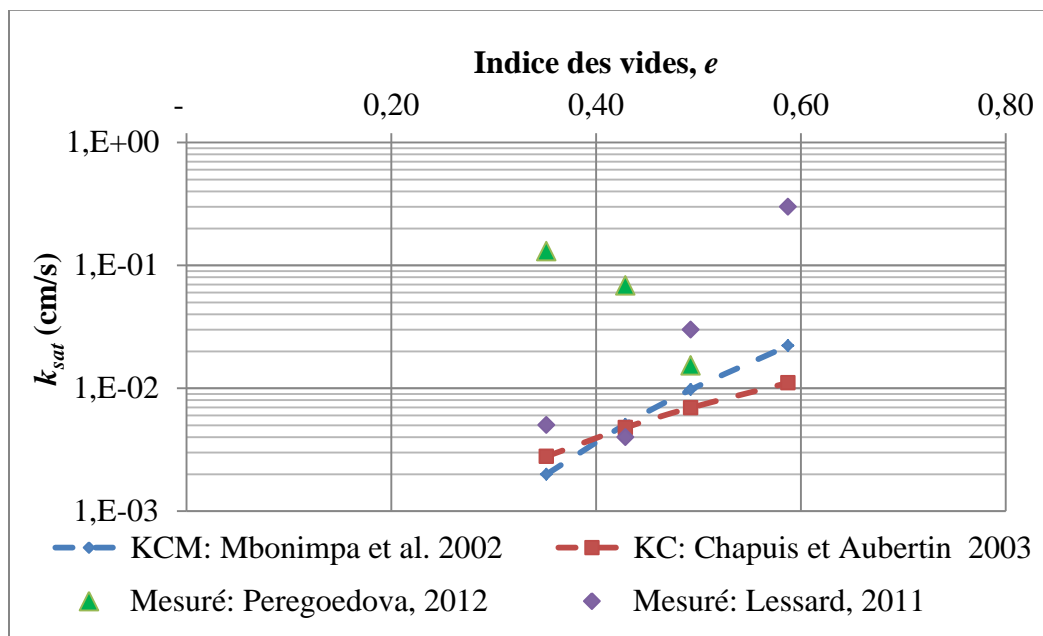


Figure 3.6 : Conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) en fonction de l'indice des vides (e)

3.3.6.1 Courbe de rétention d'eau

Les graphiques de la courbe de rétention d'eau en fonction des méthodes décrites par Aubertin et al. (2003) et Peregoedova (2012; et al., 2013) (i.e. modèles Kovács modifié [MK]) et Kovács modifié pour stériles [MKs]. La section 2.2 présente les équations de ces modèles de prédiction. Les résultats obtenus pour ces prédictions avec MK et MKs pour les roches stériles tamisées à 0-10 mm (voir distribution granulométrique section 3.3.1) sont présentées au tableau 3.4 et aux figures 3.7 et 3.8. La méthode des tangentes décrite dans Aubertin et al. (2003) a été utilisée pour évaluer les valeurs d'entrée d'air ($AEV = \psi_a$) et de la teneur en eau résiduelle θ_r pour ces CRE : elles sont présentées au tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Paramètres de la courbe de rétention d'eau (CRE) prédit par les modèles MK et MKs

Paramètres de la CRE prédite	Kovacs modifié (MK) – Aubertin et al. (2003)	Kovacs modifié pour stériles (MKs) – Peregoedova (2012; Peregoedova et al., 2013)
ψ_a minimum (cm)	4,8	8,0
ψ_a maximum (cm)	15	23
ψ_r minimum (cm)	38	32
ψ_r maximum (cm)	60	80
θ_r minimum (cm ³ /cm ³)	0,027	0,035
θ_r maximum (cm ³ /cm ³)	0,035	0,045

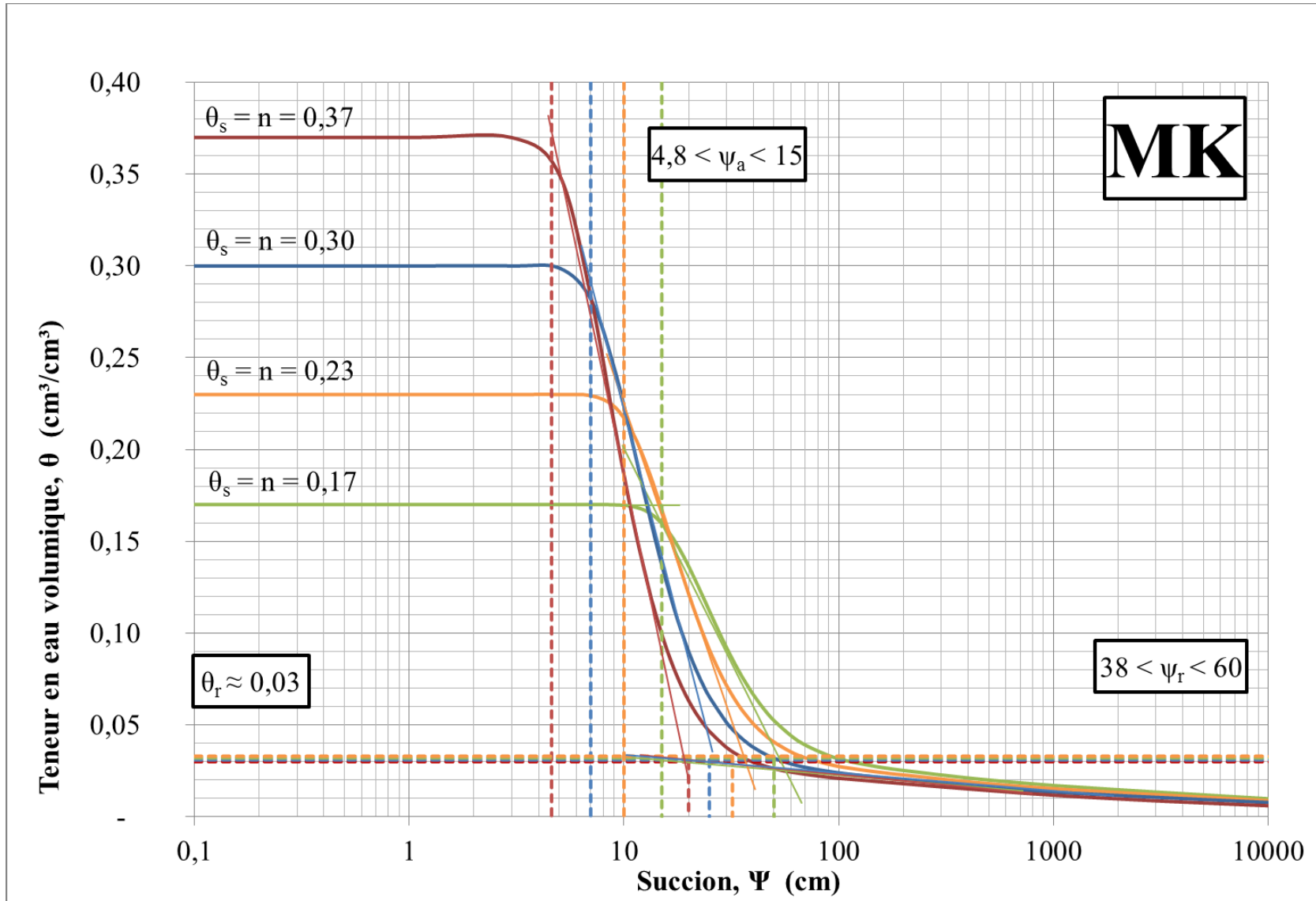


Figure 3.7 : Prédiction de la courbe de rétention d'eau pour les roches stériles tamisées selon le modèle Kovács modifié (MK).

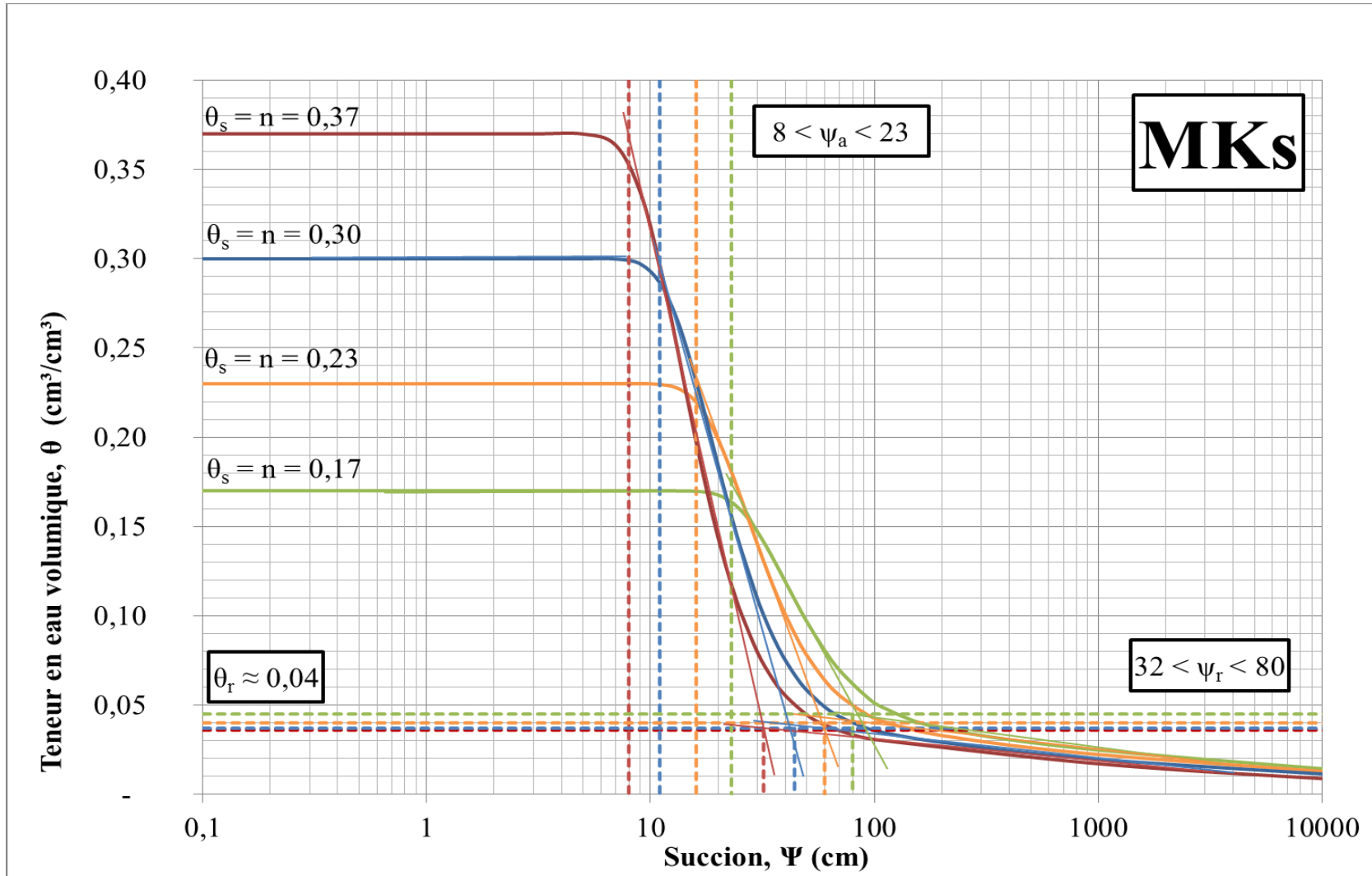


Figure 3.8 : Prédiction de la courbe de rétention d'eau pour les roches stériles tamisées utilisées pour ce projet selon le modèle Kovács modifié pour stériles (MK_s) de Peregoedova (2012).

CHAPITRE 4 PROTOCOLE DES ESSAIS EN CUVE ET EN COLONNE

Les roches stériles ont des propriétés difficiles à caractériser et à prédire, comme discuté aux chapitres 2 et 3. Il est nécessaire de faire des essais au laboratoire, ou sur le terrain, afin de mieux connaître les propriétés hydrogéologiques du matériau. Le matériau visé par les essais consiste en des roches stériles d'anorthosite ayant été tamisées pour obtenir une distribution granulométrique de 0 à 10 mm. Les propriétés relatives à l'infiltration d'eau dans le matériau ont été évaluées à l'aide d'essais originaux dans une cuve à une échelle intermédiaire de laboratoire pour différents degrés de compactage à l'aide d'essais en grandes colonnes. L'échelle de ces essais de laboratoire visait à s'approcher des conditions réelles de terrain et de caractériser le matériau. L'objectif de ce chapitre est de présenter le protocole et les conditions des essais.

4.1 Essais en colonnes

Une bonne caractérisation des propriétés hydrogéologiques des roches stériles, incluant la courbe de rétention d'eau CRE et la conductivité hydraulique saturée k_{sat} est requise pour évaluer le comportement du matériau. Les roches stériles caractérisées à l'aide des essais en colonne est le même que celui identifié au chapitre 3 et à la section 4.1. Selon les prédictions préliminaires de la courbe de rétention d'eau du matériau, l'échantillon qui permettra de déterminer la courbe complète devrait avoir des succions de 1 à 1 000 kPa (voir sections 3.2 et 3.3), ce qui correspond à la méthode E de la norme ASTM 6836-02.

Les méthodologies proposées par Chapuis et al. (2006b), Hernandez (2007) et Peregoedova (2012) ont été utilisées comme référence afin de développer la procédure de l'essai en colonne permettant d'obtenir les propriétés hydrogéologiques, c'est-à-dire la conductivité hydraulique saturée et la courbe de rétention d'eau des roches stériles. Les détails des procédures utilisées pour les essais en colonne sont à l'annexe D2, une synthèse est présentée dans ce qui suit.

4.1.1 Méthodologie expérimentale

Les essais en colonne comprennent cinq (5) principales étapes : préparation de la colonne; remplissage de la colonne avec des roches stériles à la porosité voulue, puis saturation à 100% (selon méthode proposée par Chapuis et al., 2006a); essai de perméabilité à charge constante; essai de drainage libre; démontage de la colonne et caractérisation du matériau.

Il est important de réaliser d'abord une estimation de la CRE (selon les méthodes décrites à la section 2.2) afin d'évaluer la hauteur requise pour la colonne en fonction de la succion nécessaire pour obtenir une courbe de rétention d'eau quasi complète. Ceci permet aussi de déterminer les emplacements les plus favorables pour prendre des mesures avec les tensiomètres. On cherche en particulier à évaluer la valeur d'entrée d'air [$AEV = \psi_a$], la teneur en eau résiduelle θ_v et la succion résiduelle [$WEV = \psi_r$].

La norme ASTM D5856 (conductivité hydraulique saturée) indique que le diamètre maximal [d_{max}] des particules du matériau testé doit être au plus un sixième du diamètre [D] (ou de la hauteur) de la colonne. La norme ASTM D2434 (perméabilité pour matériau granulaires) indique que le diamètre de la colonne doit être entre 8 ou 12 fois le diamètre des particules les plus grosses (Chapuis et al., 2006a). Les colonnes utilisées pour les essais ont un diamètre intérieur de 14,4 cm et une hauteur de 124 cm (par $d_{max} = 1$ cm), ces conditions sont donc satisfaisantes.

On a utilisé deux colonnes afin de produire un duplicata. La balance utilisée pour peser les colonnes devrait avoir une précision de ± 2 g (Chapuis, et al., 2006a).

4.1.2 Essai de perméabilité en colonne

L'essai de perméabilité permet de déterminer la conductivité hydraulique saturée. Il est recommandé par Chapuis et al. (2006a) de faire un essai à différence de charge constante. Les détails du protocole expérimental appliqué aux colonnes est présenté à l'annexe D2. Les résultats détaillés des essais de perméabilité sont présentés à l'annexe J. La figure 4.1 montre un schéma des installations et équipements utilisés pour les essais de drainage en colonnes. Le matériau est pré-saturé avant le début de l'essai. L'eau distillée désaérée est fournie par le baril

d'eau ayant un tube inséré pour agir comme une Mariotte et ainsi appliquer une charge constante à la surface du matériau dans la colonne. L'eau se draine au bas de la colonne dans un récipient gradué placé sur une balance qui enregistre la masse d'eau récoltée en continu.

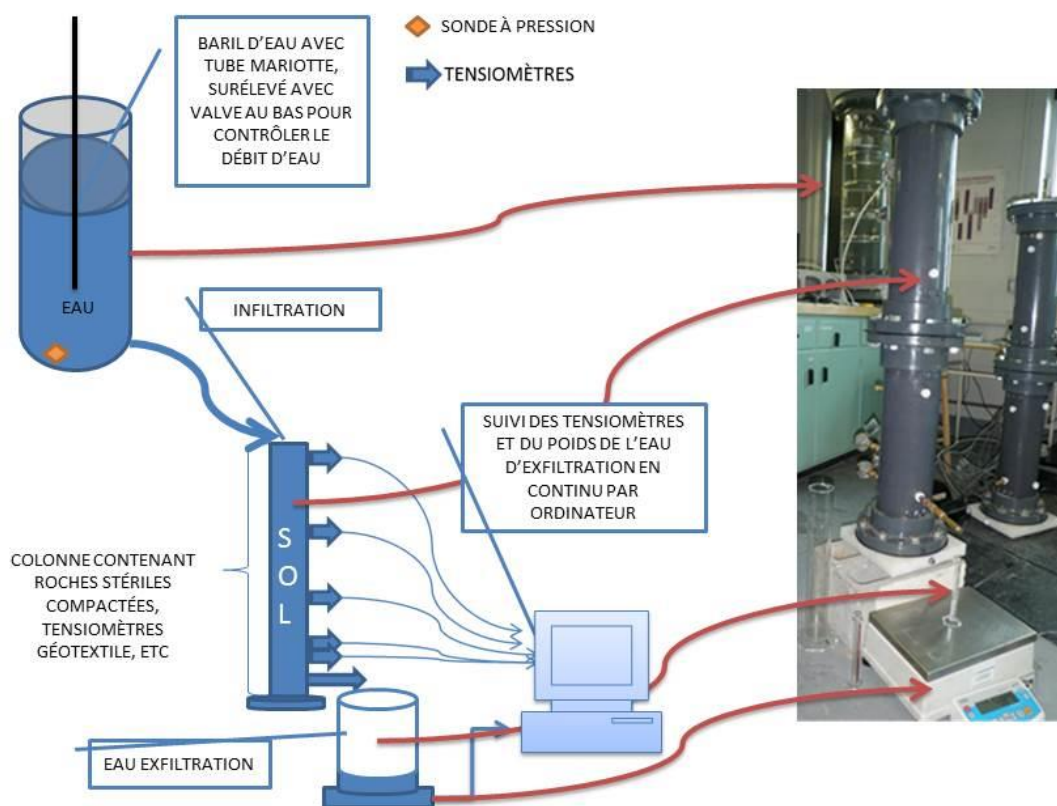


Figure 4.1 : Schéma des installations pour l'essai de perméabilité à charge constante sur les roches stériles placées dans une colonne de 1,2 m de hauteur.

4.1.3 Essai de drainage libre en colonne

L'essai de drainage permet de déterminer la CRE du matériau. L'essai de drainage libre en colonne pour les matériaux grossiers saturés a été décrit par Chapuis et al. (2006a et 2006b), Hernandez (2007), Intissar (2009) et Peregoedova (2012). Une description détaillée est fournie à l'annexe D2. Les installations pour les essais de drainage sont similaires à celle utilisées

pour l'essai de perméabilité (voir figure 4.1) à quelques exceptions près. Il n'y a aucun apport d'eau d'infiltration et l'eau se draine de la colonne par le tube en 'Z' placé au bas de la colonne.

4.1.4 Mesure de la teneur en eau résiduelle

Suite aux essais de perméabilité et de drainage en grandes colonnes, des essais ont été effectués avec les petites colonnes. Des essais de perméabilités ainsi que des essais de drainage ont été effectués. Dans ces petites colonnes, les essais de drainage ont pour objectif d'évaluer la teneur en eau volumique résiduelle θ_r du matériau. Les essais ont été effectués avec les demi-colonnes de plexiglas utilisées pour les essais en grandes colonnes. Les deux demi-colonnes sélectionnées sont presque identiques et permettent de produire un duplicata des mesures pour validation.

Deux essais ont été menés pour tenter de définir plus précisément la teneur en eau résiduelle du matériau. L'essai est très semblable avec à celui fait pour obtenir la courbe de rétention d'eau (section 4.1.3). Les différences principales sont dans la hauteur de la colonne et la succion appliquée au bas de la colonne à l'aide d'une mini-cellule créant une succion plus élevée dans la colonne afin d'accélérer le drainage libre et d'atteindre la teneur en eau résiduelle du matériau (Intissar, 2009).

La procédure décrite à l'annexe D2 inclut seulement les points qui sont différents de la procédure pour l'obtention de la CRE. Les résultats de ces essais sont présentés à l'annexe I et au chapitre 5.

Les résultats ne sont pas cohérents pour les essais en petites colonnes; ils sont exclus ici mais ils sont présentés à l'annexe I. Le problème semble se situer au niveau d'une perte de succion au bas de la colonne; l'évaporation est devenue le facteur principal de la désaturation du matériau.

4.2 Essais en cuve

La cuve utilisée pour les essais d'infiltration a un diamètre de 91 cm et une profondeur de près de 91,5 cm, voir figure 4.2. Elle est constituée d'acier et elle est munie d'une valve au bas (sur la paroi verticale) pour permettre l'exfiltration de l'eau. Le matériau a été placé en trois (3) couches dans la cuve. Les essais d'infiltration ont été réalisés à charge constante ou variable, avec et sans infiltromètre. Les essais d'infiltration ont été effectués sur les stériles pour trois (3) degrés de compactage différents. Plusieurs paramètres ont été évalués avant, pendant et après les essais. Ceux-ci sont décrits dans les tableaux 4.1 à 4.3. Ces tableaux présentent les méthodes et procédures utilisées pour obtenir les paramètres évalués au moment du montage, des essais et du démontage. Les méthodes et procédures varient en fonction de l'étape de l'essai.



Figure 4.2 : Photographie de la cuve utilisée pour les essais des montages M1, M2 et M3.

Tableau 4.1 : Caractéristiques déterminées au montage de l'essai et avant d'amorcer l'essai d'infiltration; les méthodes et procédures associées aux caractéristiques sont aussi identifiées

Paramètre	Méthode/procédure (détails section 4.2.2)
Teneur en eau massique, w (%)	À chaque deux ou trois (2 ou 3) chaudières de matériau humide (environ 60 kg), un échantillon d'environ 700 g a été prélevé afin d'effectuer la teneur en eau massique selon la procédure ASTM D2216-10. Précision $\pm 0,1$ %.
Distribution granulométrique	Pour chacune des couches de matériau placées, un échantillon a été prélevé afin de déterminer la distribution granulométrique selon la procédure ASTM D422-63. En général, l'échantillon provient d'un des prélèvements utilisé pour obtenir la teneur en eau $[w]$ lors du montage.
Masse matériau humide, M_h (kg)	Le poids humide des roches stériles de chaque chaudière placée dans la cuve a été mesuré avec une balance électronique ayant une précision de $\pm 0,002$ kg.
Volume*, V (m ³)	Deux axes perpendiculaires ont été définis (Y : nord-sud, X : est-ouest) sur le haut de la cuve. Une règle d'un mètre a été placée sur le rebord de la cuve pour mesurer à tous les 10 cm pour chacun des axes. Les mesures ont été prises avant le placement de chacune des couches de roches stériles ainsi qu'avant et après le compactage. Précision : hauteur $\pm 0,5$ cm, diamètre $\pm 0,2$ cm.
Hauteur de tombée du disque de compactage	La hauteur de tombée du disque a été prédéterminée selon les calculs. Un système contrôle de la hauteur de tombée et de la position de chaque coup a été fabriqué et est présenté à la Figure 4.6. Précision ± 1 cm.

* Les mesures de la hauteur de l'échantillon dans la cuve constituent une grande source d'erreur, ce qui affecte la précision pour la détermination du volume.

Tableau 4.2 : Caractéristiques déterminées avant, pendant et après les essais d'infiltration; méthodes et procédures associées aux caractéristiques sont aussi identifiées

Paramètre	Méthode/procédure (détails à la section 4.2.6)
Volume et débit eau infiltration	Insertion d'une sonde à pression (Micro-Diver Schlumberger modèle DI 601-10, précision ± 1 cm H ₂ O) dans la colonne utilisée pour fournir l'apport d'eau nécessaire pendant l'essai d'infiltration.
Charge eau pendant infiltration	Placement d'une sonde à pression (Micro-Diver Schlumberger modèle DI 601-10, précision ± 1 cm H ₂ O) à la surface du matériau dans la cuve pour mesurer la charge d'eau appliquée sur le matériau dans l'infiltromètre ou dans la cuve.
Volume et débit eau exfiltration	Placement d'une sonde à pression (Micro-Diver Schlumberger modèle DI 601-10, précision ± 1 cm H ₂ O) au fond du baril où l'eau d'exfiltration est accumulée. Enregistrement et mesure en continu avec une balance électronique (ayant une précision de $\pm 0,002$ kg) du poids du baril pendant l'essai.
Conductivité diélectrique (convertie en teneur en eau volumique), θ (m ³ /m ³)	Un total de 15 sondes diélectriques (marque Decagon, types, Echo-5, 5TM, et GS3) reliées à un accumulateur de données ont été placées dans la cuve (voir figure 4-7)
Quantification des sédiments dans l'eau d'exfiltration	Conservation de l'eau d'exfiltration pendant les essais et permettre la sédimentation. Mettre les sédiments et l'eau dans le four pour accélérer l'évaporation. Conserver les sédiments et les peser.

Les essais d'infiltration en cuve ont été faits sur des roches stériles pour trois degrés de compactage; trois montages et démontages ont donc été effectués. Le montage 1 [M1] est à faible degré de compactage (578 kN-m/m³ - voir équation 4-1), le montage 2 [M2] a impliqué une compaction plus élevée (2 888 kN-m/m³) et le montage 3 [M3] a été soumis au degré de compactage le plus élevé (5 828 kN-m/m³) pour les essais d'infiltration. Le premier essai [E1] de chacun des montages a été fait à charge constante en utilisant un infiltromètre à paroi rigide (voir section 5.2.2). La fin de ces essais a été complétée à charge variable. Ensuite, le deuxième essai [E2] a été fait à charge variable sur toute la surface de la cuve. Les troisièmes et les quatrièmes essais [E3] et [E4] sont faits à charge constante en utilisant l'infiltromètre et la fin de l'essai est à charge variable. Ces essais E3 et E4 ont été effectués suite à l'humidification complète de la cuve (suite à l'essai). Le tableau 4.4 résume les conditions de

base pour chacun des essais en cuve effectués dans le cadre de cette recherche. La liste complète de l'équipement nécessaire pour exécuter les essais est présentée à l'annexe D1. Plus de détails sur ces essais sont présentés dans les sections qui suivent.

Tableau 4.3 : Caractéristiques déterminées au démontage de la cuve; les méthodes et procédures associées aux caractéristiques sont aussi identifiées.

Paramètre	Méthode/procédure (détails à la section 4.2.10)
Teneur en eau massique, w (%)	Pour chaque chaudière de matériau humide (environ 22 kg), un échantillon d'environ 700 g a été prélevé afin de mesurer la teneur en eau (massique) selon la procédure ASTM D2216. Précision $\pm 0,1$ %.
Distribution granulométrique	Un échantillon a été prélevé afin d'évaluer la distribution granulométrique selon la procédure ASTM D422.
Densité, ρ_d (kg/m ³)	Les essais au cône de sable ont été effectués à trois endroits pour chacune des couches dans la cuve selon la procédure ASTM D1556.
Masse humide, M_h (kg)	La masse humide du matériau de chaque chaudière extraite de la cuve a été mesuré avec une balance électronique ayant une précision de $\pm 0,002$ kg.
Volume*, V (m ³)	Deux axes perpendiculaires ont été définis (Y : nord-sud, X : est-ouest) sur le haut de la cuve. Une règle d'un mètre a été placée sur le rebord de la cuve pour mesurer à tous les 10 cm pour chacun des axes. Les mesures ont été prises avant le placement de chacune des couches de roches stériles ainsi qu'avant et après le compactage. Précision : hauteur $\pm 0,5$ cm, diamètre $\pm 0,2$ cm

* Les mesures de la hauteur de l'échantillon dans la cuve constituent une grande source d'erreur, ce qui affecte la précision du volume exact.

Tableau 4.4 : Caractéristiques au montage pour chacun des essais en cuve sur les trois montages (M1, M2 et M3).

Identification*	Type d'essai, Aire d'infiltration (cm ²)	Charge appliquée, H_{moy} et gradient moyen, i_{moy}	Masse sèche matériau, volume, épaisseur
M1E1	Charge constante, Infiltromètre (716)	$H_{\text{moy}} = 3 \text{ cm}$, $i_{\text{moy}} = 0,1$	342 kg, 0,188 m ³ , 29,6 cm
M1E2	Variable, Cuve (6504)	$H_{\text{max}} = 12 \text{ cm}$, $i_{\text{max}} = 0,41$	
M1E3	Charge constante, Infiltromètre (716)	$H_{\text{moy}} = 1,9 \pm 0,6 \text{ cm}$, $i_{\text{moy}} = 0,06$	
M1E4 (duplicata M1E3)		$H_{\text{moy}} = 2,7 \pm 0,6 \text{ cm}$, $i_{\text{moy}} = 0,09$	
M2E1	Charge constante, Infiltromètre (716)	$H_{\text{moy}} = 2,7 \pm 0,8 \text{ cm}$, $i_{\text{moy}} = 0,09$	346 kg. 0,199 m ³ , 31,2 cm
M2E2	Variable, Cuve (6504)	$H_{\text{max}} = 13,4 \pm 2 \text{ cm}$, $i_{\text{max}} = 0,43$	
M2E3	Charge constante, Infiltromètre (716)	$H_{\text{moy}} = 3,5 \pm 1,2 \text{ cm}$, $i_{\text{moy}} = 0,1$	
M2E4 (duplicata M2E3)		$H_{\text{moy}} = 4,2 \pm 0,7 \text{ cm}$, $i_{\text{moy}} = 0,17$	
M3E1	Charge constante, Infiltromètre (716)	$H_{\text{moy}} = 3,5 \pm 0,5 \text{ cm}$, $i_{\text{moy}} = 0,14$	336 kg, 0,190 m ³ , 29,7 cm
M3E2	Variable, Cuve (6504)	$H_{\text{max}} = 16,4 \pm 0,8 \text{ cm}$, $i_{\text{max}} = 0,55$	
M3E3	Charge constante, Infiltromètre (716)	$H_{\text{moy}} = 2,8 \pm 0,7 \text{ cm}$, $i_{\text{moy}} = 0,12$	
M3E4 (duplicata M3E3)		$H_{\text{moy}} = 3,3 \pm 0,6 \text{ cm}$, $i_{\text{moy}} = 0,15$	

*Montage [M], Essai [E]

4.2.1 Préparation du matériau et compactage

Avant d'amorcer le montage des essais d'infiltration en cuve, une caractérisation du matériau employé a été exécutée. Des essais standards ont été réalisés, tel que décrit à la section 3.3, soit :

- Distribution granulométrique (ASTM D422)
- Densité relative (ASTM D854)
- Essai de perméabilité à charge constante (ASTM D2484)
- Essai de perméabilité à charge variable (ASTM D5856)
- Essai Proctor modifié (ASTM D1557)

Les modèles de prédictions décrits à la section 2.2.5 ont été utilisés pour estimer la valeur de k_{sat} et la CRE. Ces modèles aident à comprendre les facteurs qui influencent le comportement hydrogéotechnique pendant les essais. Certains paramètres des essais en cuve (durée, charge, compactage, etc.) ont été ajustés en fonction de ces prédictions et du comportement observé suite aux mesures des essais.

Le matériau placé dans la cuve a d'abord été homogénéisé selon la procédure ASTM C702 (méthode B). Les roches stériles ont été placées sur une toile et ont été mélangées en vaporisant de l'eau distillée sur le matériau jusqu'à ce que la teneur en eau soit homogène (voir figure 4.3) et près de l'optimum (w_{opt}) selon l'essai Proctor modifié (ASTM D1557). Le mouillage du stérile pendant l'homogénéisation a aussi l'avantage de réduire la formation de poussières. La première étape (figure 4.3a) de l'homogénéisation consiste à former un cône avec les roches stériles et ensuite d'aplatir ce cône (faire une tarte) avec une proportion d'une hauteur sur le diamètre d'au moins 1 :4 (la hauteur est au moins un quart du diamètre). La tarte est divisée en quatre parts égales et séparées (figure 4.3b et c). Le cône peut ensuite être refait et les étapes suivies jusqu'à ce que l'humidité du matériau soit homogène. Une fois le matériau homogénéisé (par observation visuelle), tout est placé dans la cuve en trois couches compactées.

a) Aplatissement du cône: diamètre 4 à 8 fois l'épaisseur de l'empilement



b) Division du cône aplati en 4 parts égales



c) Séparation préliminaire de chacune des parts avant la prochaine manipulation



Figure 4.3 : Quartage et homogénéisation des roches stériles selon la procédure ASTM C702-Méthode B.

4.2.2 Montage des essais d'infiltration

La cuve a été placée sur une surface horizontale solide en béton (sans inclinaison; figure 4.2), sur un caoutchouc épais afin de diminuer les vibrations du plancher et pour aider à atténuer la force de compactage appliquée sur le matériau. Le caoutchouc permet d'éviter un rebondissement de la cuve sur le béton durant le compactage, comme décrit dans la norme ASTM D698 (Proctor standard); le rebondissement fournirait une énergie de compactage non comptabilisée.

Le tuyau de sortie d'eau au bas de la cuve est situé sur la paroi extérieure de la cuve (3 cm au-dessus du fond de la cuve). Ceci permet de créer une nappe d'eau au bas et de favoriser l'écoulement horizontal vers la sortie. Cette nappe monte au niveau de l'exutoire dû à l'emplacement du stérile sous le géotextile; ceci favorise le drainage horizontal vers le tuyau de sorti d'eau. On postule que l'infiltration d'eau se fait verticalement à travers le matériau jusqu'au niveau de la nappe. Le drainage se fait vers l'exutoire à travers un autre matériau avec une conductivité hydraulique horizontale élevée soit un tapis de géotextile épais placé au bas de la cuve. Les roches stériles sont utilisées pour rehausser le géotextile au niveau de l'exutoire (voir figure 4-4). Ce matériau au fond de la cuve, sous le géotextile, est placé avec la méthode de compactage décrite à la section 4.2.3. Le géotextile a le même diamètre que la cuve et il est humidifié avec de l'eau distillé au préalable. L'exutoire est recouvert d'un géotextile afin d'éviter que les particules fines soient déplacées dans le tuyau avec l'eau de drainage.

4.2.3 Compactage

Une fois le fond de la cuve rempli avec les roches stériles humides et recouvert par le géotextile jusqu'au centre de l'exutoire (voir figure 4.4), le montage de la cuve avec le matériau compacté se fait (en une journée) en favorisant l'homogénéité des couches. Pour chacune des couches, la quantité nécessaire a été déposée en évitant la ségrégation du matériau qui est étalé uniformément avec un râteau. Les sondes diélectriques sont placées, en fonction du protocole décrit à la section 4.2.4, dans une petite tranchée pour chacune des sondes (avec leurs fils). Les sondes et les fils sont recouverts et les fils sont fixés sur les parois de la cuve (en permettant le déplacement pendant la compaction).

Chaque couche placée dans la cuve a été compactée. L'énergie appliquée pour chacune des couches a été prédéterminée en fonction de la formule présentée dans Kalinski (2009).

$$E = \frac{BLW_h D}{V_m} \quad (4-1)$$

Où :

E : Énergie appliquée lors du compactage [M-L/L³]

B : Nombre de coups (chutes) par couche de matériau [-]

L : Nombre de couches de matériau [-]

W_h : Masse du disque (kg) [M]

V_m : Volume de la couche (cm³) [L³]

D : Hauteur de tombé du poids (cm) [L]

Le disque de compactage utilisé dans la cuve a un diamètre égal à la moitié du diamètre de la cuve (45,5 cm) et ayant un poids de 11,8 kg (voir figure 4.5).

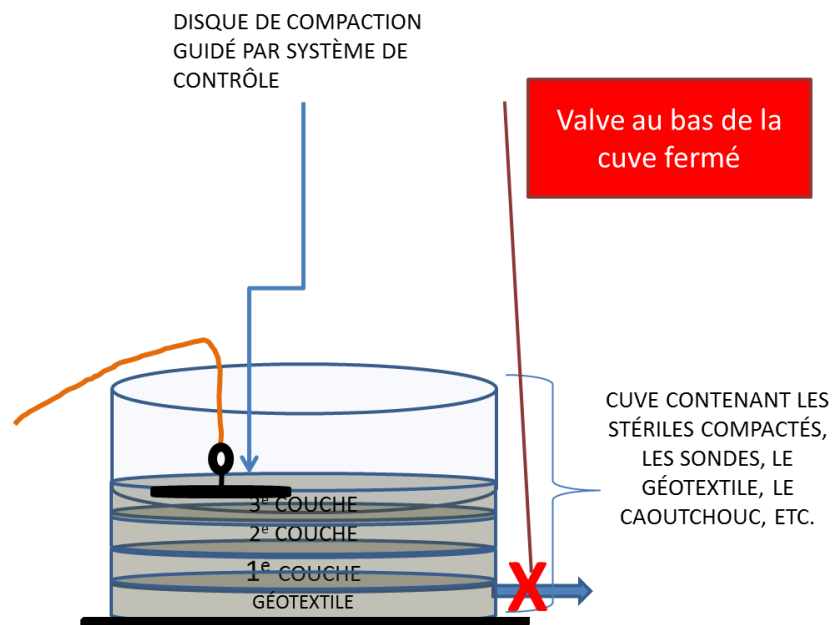
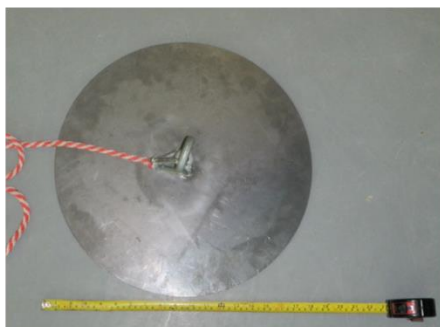


Figure 4.4 : Représentation schématique du montage dans la cuve (aucune échelle). Chaque couche a une épaisseur d'environ 10 cm.

Un instrument de guidage (figure 4.5), a été fabriqué pour le compactage afin d’assurer le contrôle de la hauteur (prédéterminé avec équation 4-1) et de la position (schéma présenté à la figure 4.6) du disque de compactage. L’instrument est fixé au centre de la cuve sur la paroi pendant le compactage.

a) Disque de compactage



b) Instrument de guidage pour le compactage



c) Ajustement de l’instrument de guidage sur la cuve



Figure 4.5 : Disque et instrument de guidage utilisé pour contrôler la position et la hauteur de tombée du disque lors du compactage des roches stériles dans la cuve.

Le schéma de compactage avec le disque est présenté à la figure 4.6. Cette méthode permet de contrôler l’énergie appliquée au matériau dans la cuve. Cette forme de compactage a été adaptée à partir de la procédure ASTM D698.

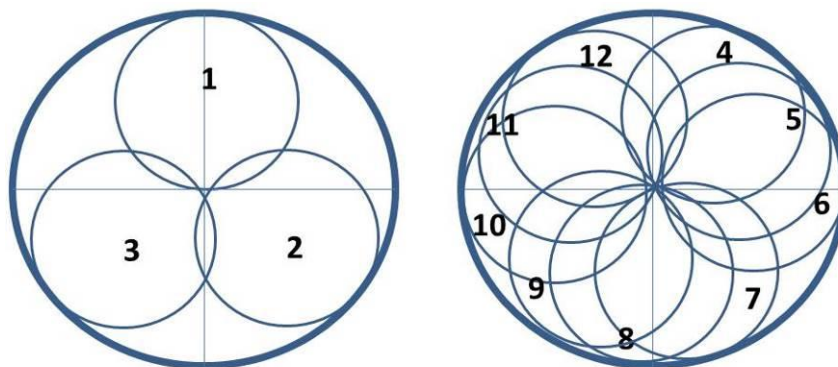


Figure 4.6 : Schéma du positionnement du disque lors du compactage (inspiré de la procédure ASTM D698).

L'épaisseur axe-Z (à partir de la surface) du matériau est mesurée avant et après compactage pour chaque couche, selon le diagramme en croix présenté à la figure 4.7, à 20 endroits le long des axes des X et Y ci-dessous. La figure 4.8 illustre la position des relevés dans la cuve; la position pour prendre la mesure au centre est montrée sur la photo.

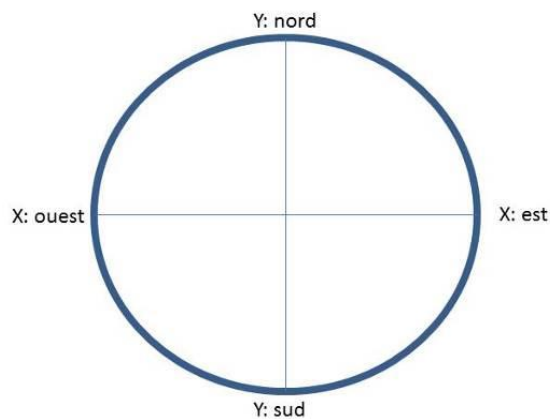


Figure 4.7 : Diagramme en croix (axes X et Y) utilisé pour les mesures de la hauteur du matériau à divers endroits dans la cuve.



Figure 4.8 : Photo qui montre la méthode pour mesurer la hauteur du matériau dans la cuve

4.2.4 Position des sondes et disposition de l'infiltromètre

Les sondes ont été positionnées horizontalement selon le schéma montré à la figure 4-8 dans le but d'éviter qu'elles soient endommagées et qu'il y ait de l'eau qui s'accumule sur la partie aplatie des tiges (ce qui fausserait les données). Lorsqu'une sonde est insérée, le matériau l'entourant doit être remplacé (avec une cuillère) pour s'assurer qu'elle soit complètement couverte. Les sondes ont un rayon d'influence de 5 cm de diamètre; il doit donc y avoir au moins 5 cm entre chacun des capteurs et les parois du récipient ou la surface (Decagon, 2015). Il doit y avoir au moins 5 cm entre chaque sonde et les parois de la cuve. Les câbles sont placés sur le bord de la cuve et fixés avec du papier collant en prenant soin de laisser un peu de flexibilité dans les câbles pour permettre le déplacement pendant le compactage.

Le placement des sondes montré à la figure 4.9, se fait selon la méthode illustrée à la figure 4.8 pour chacune des couches. Le placement des sondes pour la troisième couche est différent, car l'infiltromètre est inséré sur 5 à 10 cm de profondeur. Il faut éviter que les sondes et les fils

soient en contact avec le cylindre. Cet infiltromètre a un diamètre intérieur de 30 cm (soit un tiers (1/3) du diamètre de la cuve) (Chapuis et al., 2006a).

Les sondes EC-5, 5TM et GS3 enregistrent toutes des données pouvant être converties en teneur en eau volumique θ_v et ont été placées à tous les autres endroits sélectionnés pour la prise de données (voir figure 4.9). Les sondes diélectriques de type 5TM et GS3 (Decagon) sont placées dans les deux couches du fond (1^{ière} et 2^{ième} couches; voir figure 4.9); ces sondes enregistrent aussi la température, mais ces mesures n'ont pas été utilisées pour l'interprétation des résultats. Au moment des essais, deux sondes 5TM et deux sondes GS3 étaient disponibles.

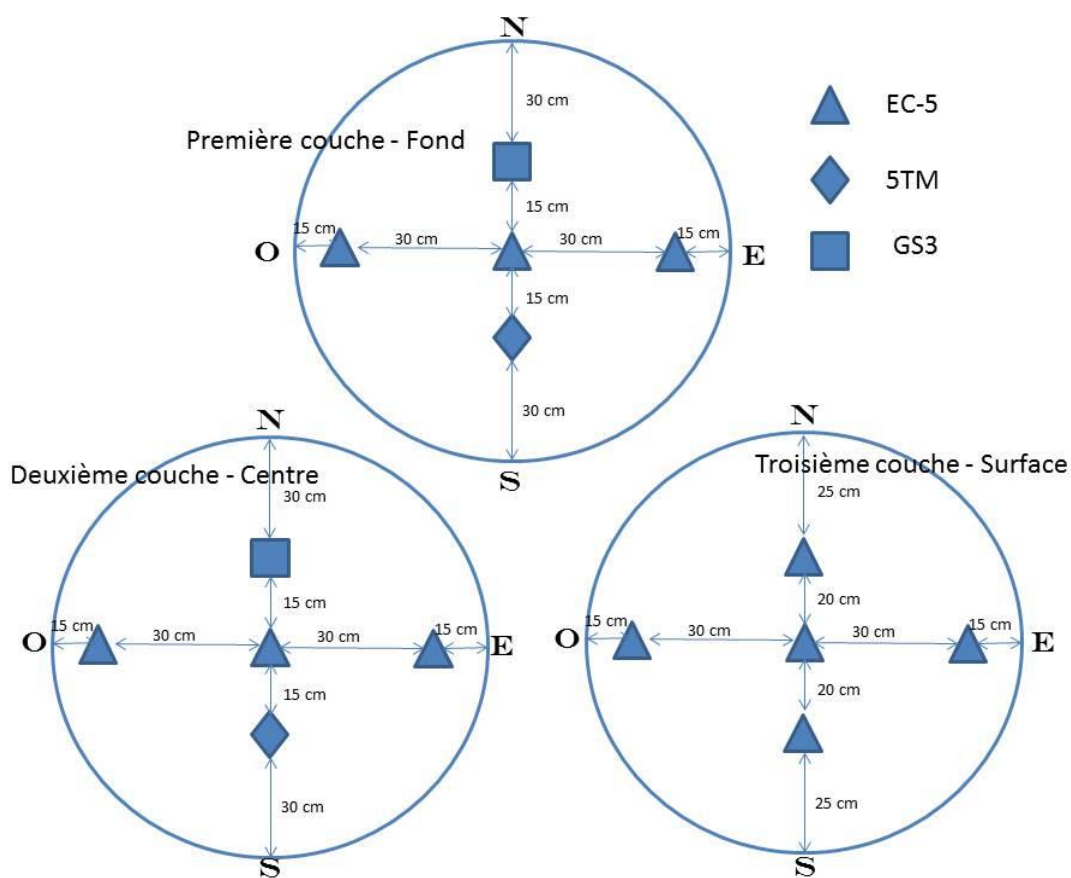


Figure 4.9 : Emplacement des sondes diélectriques pour chacune des couches de matériau

L'infiltromètre à paroi simple est placé au centre de la cuve jusqu'à une profondeur entre 5 et 10 cm (pour limiter l'écoulement latéral) en le frappant avec une masse en caoutchouc. La figure 4.10 montre la cuve pendant l'essai de drainage. On y voit l'infiltromètre à paroi simple situé au centre, les cinq (5) sondes à pression et les fils des sondes diélectriques enfouis dans le matériau.

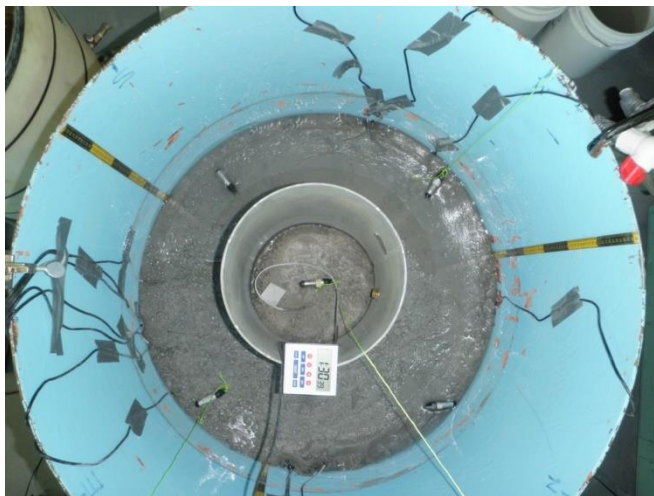


Figure 4.10 : Vue à partir du dessus de la cuve pendant l'essai de drainage.

4.2.5 Évaluation des caractéristiques des stériles

Suite aux mesures prises pendant le montage, plusieurs paramètres ont été évalués pour connaître les caractéristiques du matériau. Notons que les mesures au premier montage (Montage 1, M1) sont moins complètes que pour les essais subséquents. Suite à cette expérience acquise, des mesures supplémentaires ont été effectuées aux montages M2 et M3. Les détails suivants incluent les modifications adoptées pour M2 et M3 :

- Teneur en eau massique, w (%):
 - Pour chacune des couches ajoutées dans la cuve lors du montage, deux échantillons (plus de 700g d'échantillon) ont été récupérés pour

mesurer la teneur en eau (w) selon la procédure ASTM D2216-10 méthode B (précision $\pm 0,1\%$).

- Volume total du matériau, V_T (cm³):
 - Au montage, la hauteur de la surface de chaque couche a été mesurée à 20 emplacements selon un schéma nord-sud est-ouest (voir figure 4.7). Le volume a été calculé en fonction de l'épaisseur de chaque couche et des dimensions de la cuve.
- Masse sèche, M_s (kg) :
 - La masse sèche totale du matériau dans la cuve est la somme des masses sèches calculées en fonction des teneurs en eau massique mesurées.
- Poids unitaire sec, γ_d (kN/m³) = $M_s \cdot g / V_T$
 - Montage M1 Masse sèche totale du matériau dans la cuve.
 - Montage M2 et M3 : Masse sèche totale de chacune des couches du matériau dans la cuve.
- Masse eau, M_w (kg) = wM_s
- Volume d'eau, V_w (cm³) :
 - Calcul pour chaque couche de matériau (3), le volume de l'eau est calculé en fonction de la relation de la densité de l'eau estimée à 0,998 g/cm³ pour une température à 22°C. Équation (ASTM D698-12) :

$$\rho_{w,c} = 1,00034038 - (7,77 \times 10^{-6}) \times T - (4,95 \times 10^{-6}) \times T^2$$
- Volume des solides, V_s (cm³) = $M_s / (D_R \cdot \rho_w)$
- Volume des vides, V_v (cm³) = $V_T - V_s$
- Porosité, $n = V_v / V_T$
- Indice des vides, $e = V_v / V_s$
- Degré de saturation, S_r (%) = V_w / V_v

- Teneur en eau volumique, $\theta \text{ (m}^3/\text{m}^3) = nS_r = w(1-n)D_R$

4.2.6 Réalisation des essais d'infiltration

Il a été jugé préférable de faire le premier essai d'infiltration [E1] rapidement après le montage afin de conserver les caractéristiques homogènes. Quatre (4) essais d'infiltration ont été exécutés dans chacun des montages. Le premier [E1] est un essai à charge constante avec l'infiltromètre placé au centre de la cuve, suite au montage et la compaction des roches stériles. Le second est un essai [E2] à charge variable où la cuve au complet est rempli d'eau. Le troisième essai [E3] est un essai à charge constante avec infiltromètre suite à l'humidification du matériau [E2]; le quatrième essai [E4] est un duplicata du troisième. Lorsqu'il n'y a pas d'essais en cours, la cuve est recouverte pour limiter l'évaporation de l'eau. Les mesures de hauteur (profondeur) du matériau dans la cuve sont enregistrées avant et après chaque essai afin d'évaluer s'il y a affaissement ou gonflement à la surface.

4.2.7 Essais à charge constante

Préparation

L'équipement requis pour effectuer les essais d'infiltration à charge constante est présentée ici. La disposition des équipements pour les essais est montrée à la figure 4.11. Cette figure montre le baril contenant l'eau utilisé pour les essais d'infiltration 1), la cuve et l'infiltromètre 2), la cuve de collection de l'eau d'exfiltration 3), ainsi que la pompe péristaltique 4), qui transfère l'eau de la cuve de collection à un baril 5), ayant une plus grande capacité. Le volume d'eau d'exfiltration est enregistré dans le baril avec une sonde à pression et balance relié à l'ordinateur 6) à grande capacité suite au transfert de l'eau avec la pompe; ceci entraîne un délai négligeable entre le moment d'exfiltration réel versus celui enregistré. La charge d'eau d'infiltration est mesurée dans la cuve dans l'infiltromètre et dans le baril d'eau d'infiltration (voir figure 4.11).

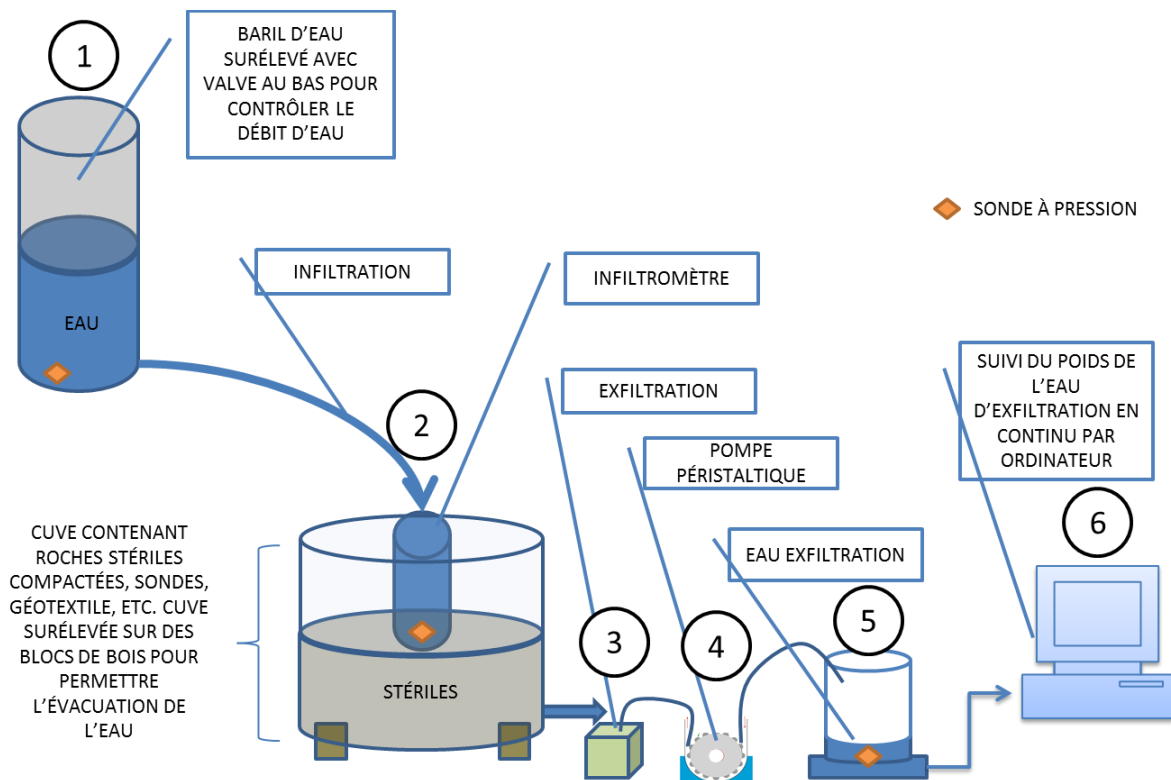


Figure 4.11 : Équipements utilisés pour les essais d'infiltration à charge constante dans la cuve. Schéma et photo.

Les étapes pour se préparer à réaliser ces essais peuvent être énumérés comme suit :

- Placer une sonde à pression à l'air libre (en tout temps) pour être utilisé comme baromètre et ainsi permettre de corriger le changement de charge d'eau en fonction du temps.
- Préparer l'enregistrement des sondes diélectriques avec une lecture à chaque minute à l'aide des boîtiers d'enregistrement des données (voir figure 4.12). Les sondes présentées à la section 2.6 sont reliées aux boîtiers de la figure 4.12.



Figure 4.12 : Boîtiers d'enregistrement des données des sondes diélectriques (Decagon Em50).

- Remplir deux colonnes d'eau distillée (figure 4.13) équipées d'une sonde à pression (enregistrement aux 10 secondes) à la base de chacune pour mesurer la pression d'eau pendant l'essai. Placez la colonne d'eau sur une table surélevée, avant le remplissage pour que l'eau soit amenée par gravité vers la cuve.

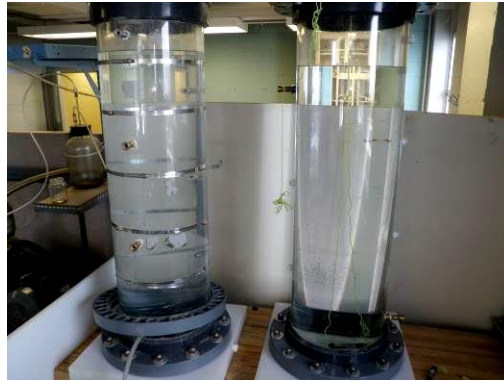


Figure 4.13 : Colonnes remplies d'eau distillée désaérée sous vide.

- Mettre un petit récipient à la sortie pour collecter l'eau d'exfiltration. Placer une ou des pompes péristaltiques en aval pour pomper l'eau à partir du petit récipient jusqu'au baril placé sur la balance électronique.
- Placer un baril sur la balance électronique. Celle-ci est reliée à un système d'acquisition de données automatique pour faciliter la prise de données à intervalles de temps réguliers.
- Mettre une sonde à pression (enregistrement aux 10 secondes) dans le baril pour suivre la pression d'eau pendant l'exfiltration (voir figure 4.14). Il est important de pré-remplir le baril avec de l'eau distillée pour couvrir la sonde à pression afin qu'elle débute les enregistrements dès le début des exfiltrations. On prend la masse de référence (tare) avec le baril, l'eau et la sonde.



Figure 4.14 : Placement d'une sonde à pression dans le baril d'exfiltration en incluant une couverture d'eau.

- Préparer le tuyau de sortie d'eau pour qu'il atteigne l'infiltromètre placé au centre de la cuve (voir figure 4.15). Remplir le tuyau avec de l'eau distillée. À la fin de l'essai, on ferme la valve au bout du tuyau afin d'avoir le volume d'eau introduit dans la cuve (sans inclure l'eau qui était dans le tuyau au début de l'essai).
- Placer une sonde à pression (enregistrement aux 10 secondes) au centre de l'infiltromètre pour enregistrer les changements de la charge appliquée.
- Mettre un sac de plastique dans l'infiltromètre et le remplir d'eau distillée (jusqu'à la ligne de 3 cm). Peser l'eau requise en fonction du diamètre de l'infiltromètre pour obtenir une charge d'eau de 3 cm (approximative) et la verser dans le plastique.

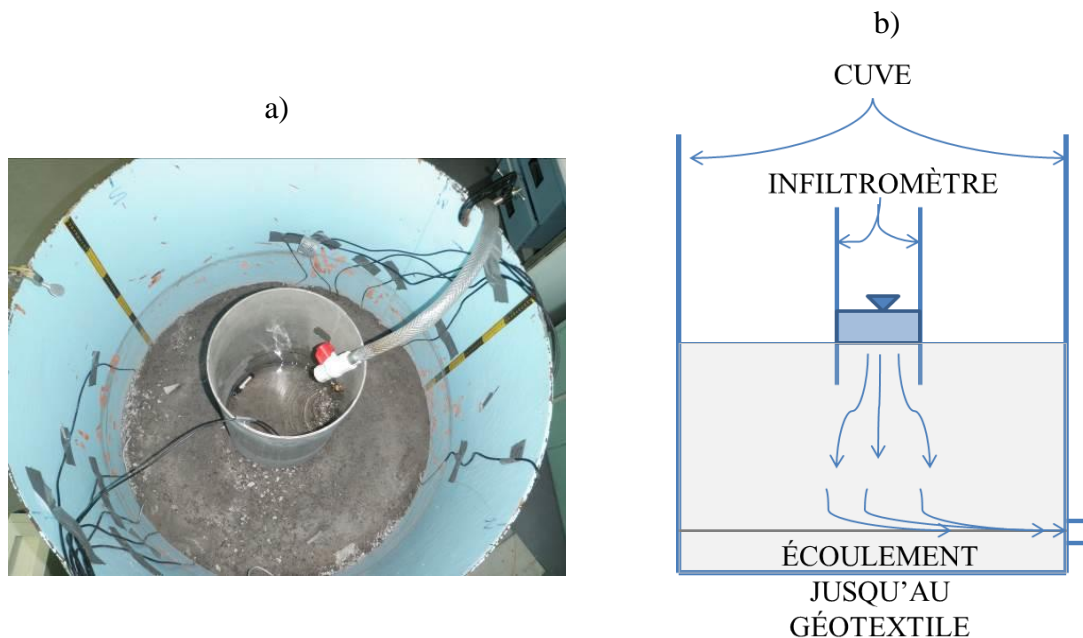


Figure 4.15 : Tuyau fournissant l'eau provenant de la colonne jusqu'au centre de l'infiltromètre (a) en évitant le déplacement des particules en surface du matériau. Vue de côté du réseau d'écoulement schématisé lors des essais d'infiltration (b)

Exécution

Au moment de débiter l'essai, le sac de plastique placé dans l'infiltromètre est enlevé et la valve du tuyau provenant de la colonne est ouverte pour contrôler le rythme de l'infiltration. Le niveau d'eau dans l'infiltromètre est maintenu à 3 cm pendant toute la durée de l'essai. L'essai est conduit à charge constante jusqu'à stabilisation du système c.-à-d. lorsque le débit d'eau infiltrée est semblable au débit d'eau d'exfiltration OU lorsque le débit d'exfiltration reste constant pendant plus d'une heure (ceci est arbitraire et peut être plus court ou plus long selon le type de données recherchées).

À la fin de l'essai à charge constante, on mène un essai avec une charge variable, en fermant la valve de la colonne et laissant le niveau d'eau dans l'infiltromètre descendre. On enregistre le temps que l'eau met à s'écouler dans l'infiltromètre jusqu'au niveau de la surface du matériau.

La quantité d'eau qui sort au point d'exfiltration est mesurée jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'eau de sortie. On continue à récupérer l'eau d'exfiltration à intervalles de temps réguliers en versant l'eau du petit récipient dans le baril ou dans un autre contenant sur une balance plus précise. L'essai est terminé lorsque les lectures des sondes diélectriques dans la cuve sont stables.

4.2.8 Essais à charge variable

Préparation

L'équipement à préparer pour effectuer les essais d'infiltration à charge variable est présentée ici-bas. La disposition proposée des équipements pour les essais est montrée à la figure 4.16:

- Remplir la cuve par le bas (l'exutoire au bas de la cuve) avec l'eau désaérée avec un gradient hydraulique faible jusqu'à environ à 15 cm de charge au-dessus de la surface. Puisqu'il n'y a pas de succion appliquée, le processus de saturation est long et le degré de saturation atteint est usuellement sous 80% (Chapuis et al., 2006). Le degré de saturation n'est pas calculé, car la quantité d'eau ajoutée n'est pas enregistrée et il n'y a pas de balance capable de mesurer le poids de la cuve avant et après le remplissage.
- Placer cinq (5) sondes à pression (enregistrement aux 10 secondes) 1), dans la cuve sous la surface de l'eau pour enregistrer les changements de la charge appliquée à la surface pendant le drainage.
- Mettre un petit récipient à la sortie de l'exutoire d'eau 2), pour collecter l'eau d'exfiltration. Placer des pompes péristaltiques 3), en aval pour pomper l'eau à partir du petit récipient jusqu'au baril 4), placé sur la balance électronique.
- Placer un baril sur la balance électronique. Celle-ci est reliée à un système d'acquisition 5).
- Mettre une sonde à pression (enregistrement aux 10 secondes) dans le baril 4), pour suivre la charge d'eau pendant l'exfiltration. Il est important de pré-

remplir le baril avec de l'eau distillée pour couvrir la sonde à pression afin qu'elle débute les enregistrements de données dès le début des exfiltrations. S'assurer de prendre la masse de référence 'tare' avec le baril, l'eau et la sonde (voir figure 4.16).

- Avoir une sonde à pression à l'air libre en tout temps pour être utilisé comme baromètre et ainsi faciliter le calcul du changement de charge d'eau en fonction du temps.
- Préparer l'enregistrement des sondes diélectriques avec une programmation à chaque minute.

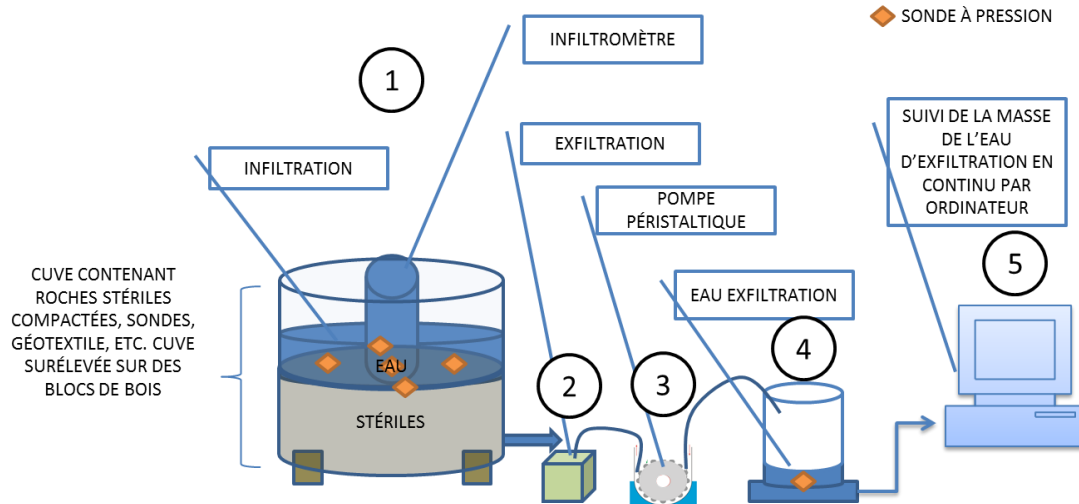


Figure 4.16 : Représentation de l'installation des équipements pour effectuer les essais d'infiltration à charge variable.

Exécution

L'essai débute au moment où la valve de l'exutoire pour l'exfiltration d'eau au bas de la cuve est ouverte. On note le temps que l'eau met à descendre dans la cuve jusqu'au niveau de la surface.

La quantité d'eau de drainage au point d'exfiltration est mesurée jusqu'à ce que le débit soit négligeable. L'essai se termine lorsque les lectures des sondes diélectriques situées dans la 3^e couche (surface) dans la cuve sont stables.

4.2.9 Caractéristiques des essais d'infiltration

Divers paramètres peuvent être évalués pour caractériser chacun des essais. Les lecteurs des sondes à pression et les sondes diélectriques, doivent avoir été convertis selon les calibrations établies (voir annexe C). Les détails suivants indiquent la façon de procéder pour déterminer les paramètres servant à la caractérisation des essais.

- Charge eau, h (cm H₂O) :
- Volume total, $V_s = h \cdot \text{Aire de la surface d'infiltration}$
- Volume eau, V_e (cm³)
- Débits, q_e (cm³/s) = V_e/t .
- Teneur en eau volumique, θ_v (m³/m³)
- Masse sédiments transportés par l'eau à l'exfiltration, $M_{\text{séd}}$ (g) :
 - On conserve l'eau récupérée à l'exfiltration lors des essais (voir figure 4.17). Récupérer les sédiments et les peser, $M_{\text{séd}}$ (g).
- Les échantillons sont envoyés à l'UQAT pour les analyses minéralogiques DRX.



Figure 4.17 : Décantation des sédiments provenant de l'exfiltration dans les chaudières

Les graphiques ont été préparés après chacun des essais pour évaluer le déroulement des essais avant d'entreprendre l'essai suivant. Les graphiques suggérés sont :

- Charge (h) tracés versus le temps (t) : la pente permet d'obtenir la vitesse d'infiltration ou d'exfiltration de l'eau.
- Débit (q_e) d'entrée et sortie versus le temps (t) : Permet de voir les tendances d'infiltration (augmente, régresse).
- Teneur en eau volumique (θ_v) versus temps (t) : Lorsque la teneur en eau volumique dans la couche à la surface est près de la valeur résiduelle estimée avec les modèles prédictifs, le prochain essai peut débuter.

Ces graphiques permettent de comparer les essais avec les résultats obtenus en utilisant les méthodes de prédiction (voir section 3.3.6) et de déterminer si l'essai est terminé avant de débiter le suivant.

4.2.10 Démontage de la cuve

Le démontage de la cuve permet de déterminer les caractéristiques du matériau. Les paramètres évalués sont décrits dans le tableau 4.3. La liste suivante résume les étapes à suivre lors du démontage de la cuve :

1. Retirer les sondes diélectriques en surface et localiser leurs emplacements selon le système de coordonnées X, Y et Z développé à la section 4.2.2.
2. Prendre un échantillon où chacune des sondes était positionnée et faire une mesure de teneur en eau (w) selon la procédure ASTM D2216-10.
3. Localiser deux à trois endroits où la surface du matériau est intacte et réaliser les mesures de densité en place au cône de sable (ASTM D1556-07 et annexe D). Positionner l'endroit où les tests sont faits en utilisant la méthode décrite par le diagramme à la figure 4.6.
4. Sortir l'équivalent d'une couche de matériau (environ 30 cm dans ce cas-ci) et enregistrer la masse de chacune.
5. Prendre un échantillon de matériau pour chacune des chaudières retirées de la cuve et faire un essai de teneur en eau (w) selon la procédure ASTM D2216-10.
6. Prendre un échantillon représentatif pour faire un test de distribution granulométrique selon la procédure ASTM D422-63. Le même échantillon utilisé pour la teneur en eau peut être utilisé pour l'essai de distribution granulométrique.
7. Lorsque l'équivalent d'une couche a été retiré, prendre les mesures de hauteur de la surface selon le diagramme à la figure 4.7.
8. Répéter les actions 1 à 7 pour chacune des couches.
9. Conserver le géotextile en place au fond de la cuve afin que le niveau de référence soit le même pour tous les essais.

4.2.11 Évaluation des caractéristiques au démontage

Suite aux mesures prises pendant le démontage, plusieurs paramètres peuvent être évalués pour de connaître les caractéristiques du matériau. Notons que les mesures prélevées au premier démontage (Montage 1, M1) sont moins complètes que pour les essais subséquents. Suite à cette expérience acquise, des mesures supplémentaires ont été effectuées aux montages

M2 et M3. Les détails qui suivent incluent les modifications appliquées pour le démontage à l'évaluation des caractéristiques comme décrit à la section 4.1.5 (montage).

- Poids unitaire sec, γ_d (kN/m³) :
 - Cône de sable : Masse sèche divisée par volume du trou selon sable transvidé multiplié par la gravité. $\gamma_d = M_{s\text{-trou}} * g / V_{\text{Trou-sable}}$

CHAPITRE 5 PRINCIPAUX RÉSULTATS DES ESSAIS

Ce chapitre présente les principaux résultats des essais en colonnes (section 5.1) et des essais en cuve (section 5.2) sur les roches stériles tamisées à 0-10 mm de diamètre. Les protocoles expérimentaux se trouvent au chapitre 4 pour ces essais.

Les principaux résultats des essais de caractérisation effectués au montage et au démontage sont présentés pour chacun des essais en cuve et en colonne dans ce chapitre et aux annexes A, B, G, I et J. Les principaux résultats des essais sont analysés et interprétés au chapitre 6.

Les essais ont été effectués entre septembre 2013 et décembre 2014. De l'eau distillée a été utilisée pour tous les essais. L'eau distillée a été désaérée dans une colonne de désaération de 30 cm de diamètre et 183 cm de hauteur. L'eau a ensuite été transférée dans une colonne de 30,5 cm de diamètre et 116 cm de hauteur qui était à découvert (exposé à la pression atmosphérique).

Le même lot de roches stériles tamisées de 0 à 10 mm, composé principalement d'anorthosite, a été utilisé pour tous les essais. Les conditions avant, pendant et après les essais ont aussi été évaluées à partir des valeurs relevées par les sondes diélectriques et les tensiomètres pour les essais en cuve et en colonnes, respectivement. Les méthodes d'évaluation de la précision des mesures sont décrites à la section 3.1.

5.1 Essai en colonne

Les essais en colonnes permettent de caractériser certaines propriétés des roches stériles selon le protocole décrit à la section 4.2 (décrit plus en détail à l'annexe D2). Cette caractérisation aidera à analyser les divers résultats. L'objectif des essais en colonnes est de déterminer la conductivité hydraulique saturée k_{sat} (figure 5.2 sortie d'eau #1) et la courbe de rétention d'eau [CRE] (figure 5.2 sortie d'eau #2) du matériau. Ces essais ont été effectués dans deux colonnes de plexiglas presque identiques. Des conditions d'essais semblables permettent de comparer et combiner les données.

Les colonnes sont identifiées A et B. Chacune est constituée de deux petites sections de 67 cm de hauteur et de 14,4 cm de diamètre interne (voir figure 5.1). Une pierre poreuse est placée à la base de la colonne. Par-dessus la pierre poreuse se trouvent une plaque de plastique perforée et un géotextile (voir figure 5.2). Ceci permet à l'eau de bien s'écouler vers la pierre poreuse (hors de la colonne en utilisant la sortie #2 identifié à la figure 5.2) et évite que les particules fines obstruent les pores de la pierre. La pierre poreuse utilisée pour les essais de drainage a une valeur d'entrée d'air 50 kPa (0,5 bars) et une conductivité hydraulique saturée de $3,11 \times 10^{-5}$ cm/s (voir annexe B pour les spécifications du fournisseur).

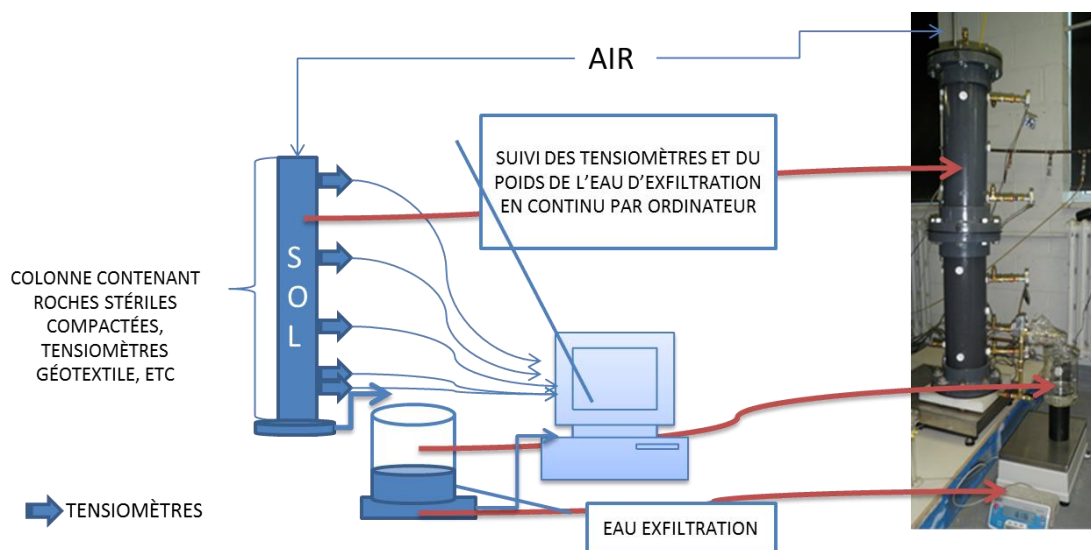


Figure 5.1 : Schéma des essais de drainage en colonne

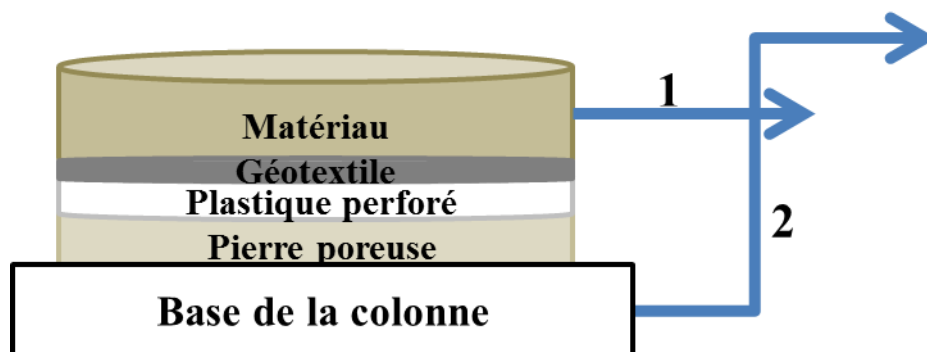


Figure 5.2 : Configuration du bas de la colonne sous le matériau et schématisation et points de sortie de l'eau. Sortie #1 utilisée pour les essais de perméabilité; sortie #2 utilisée pour les essais de drainage.

Le compactage des roches stériles dans les colonnes s'est fait à l'aide du marteau utilisé pour les essais de compactage Proctor modifié (norme ASTM D1557) sur des couches d'environ 5 cm ($\pm 0,2$ cm) d'épaisseur. La procédure utilisée pour le montage des colonnes est décrite en détail à l'annexe D2.

La position de l'eau libre (hauteur de sortie de l'eau du tube en 'Z', voir figure 5.3) qui devait être créée par le tube de sortie est située à une profondeur de 96,8 cm (sous la surface) pour la colonne A et à 92,4 cm pour la colonne B (voir figure 5.4). Il n'est toutefois pas certain que le tube en Z ait bien joué son rôle, de sorte que la pression d'eau réelle au bas de la colonne a peut-être différée de la valeur visée (i.e. pression différente de de zéro à l'élévation de la sortie du tube).

La porosité n des roches stériles dans les colonnes varie entre 20% et 29% ($\pm 1\%$) et est variable au montage; les valeurs détaillées sont présentées à la figure 5.5a. Le poids volumique sec γ_d des roches stériles mesuré dans les colonnes est présenté à la figure 5.5b; la valeur de γ_d varie entre 19,1 et 21,7 kN/m³ ($\pm 0,002$ kN/m³).

La figure 5-6a montre la zone où le degré de saturation est plus élevé sous le tube de drainage. Cette zone montre aussi une porosité plus élevée et un poids unitaire γ_d plus faible. Le degré de saturation S_r est toutefois bien inférieur à 100% dans cette zone. Basée sur ces données, on peut néanmoins estimer que la frange capillaire serait entre 22 et 26 cm de hauteur. Cette

frange capillaire est constitué du matériau qui se maintient « presque saturée », i.e. pour $\psi < \psi_a$. La précision des données au démontage est meilleure puisque la masse de l'échantillon complet a été mesurée pour définir la teneur en eau massique, w , seulement une portion d'un échantillon a été utilisée pour prendre les mesures de teneur en eau massique w au montage. La variation des valeurs du poids unitaire sec γ_d entre le montage et le démontage (figure 5.5b) pourrait être attribuable en partie, à la précision des mesures (surtout de la teneur en eau massique). La mesure du volume au montage est aussi imprécise notamment due au marteau de compactage qui crée une cavité au dernier endroit compacté.

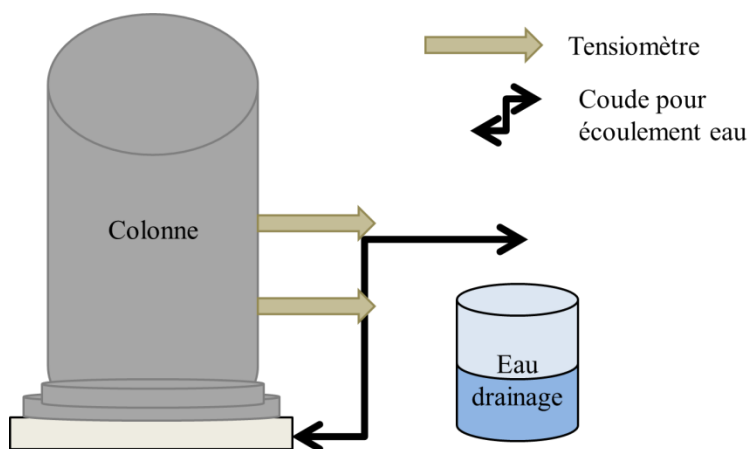


Figure 5.3 : Schéma du tube de sortie en 'Z' avec un double coude utilisé pour l'essai de drainage en colonne.

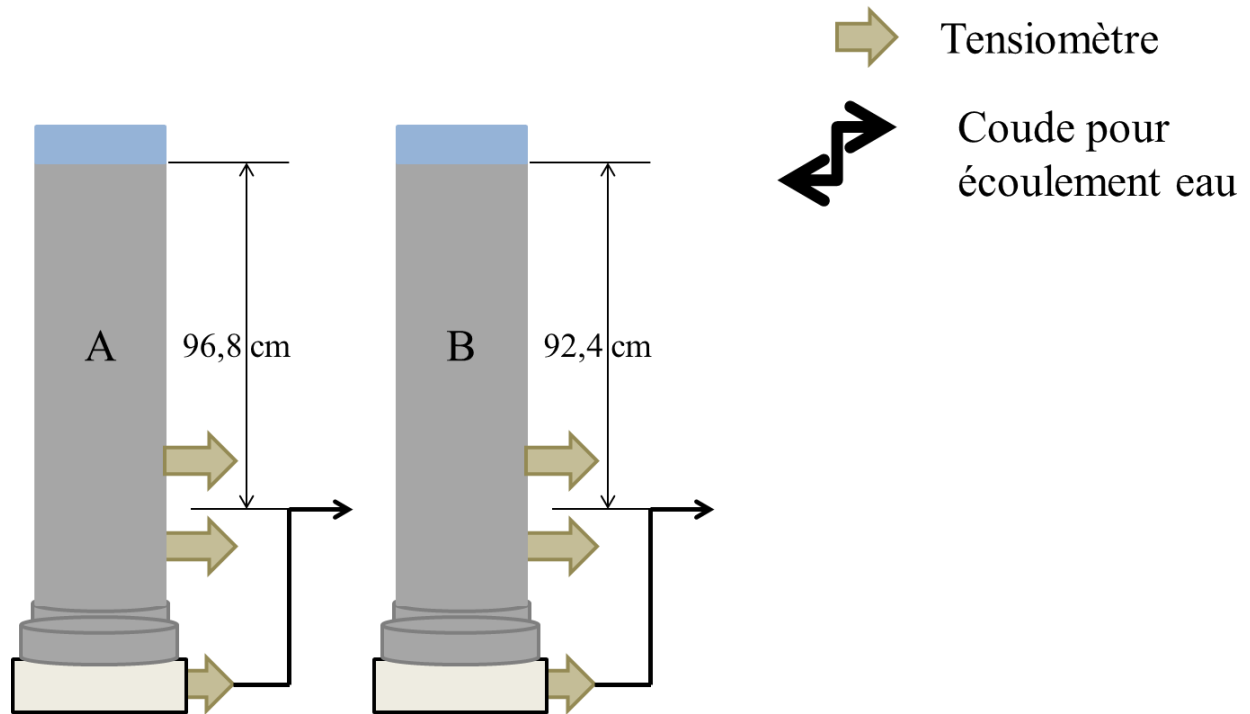
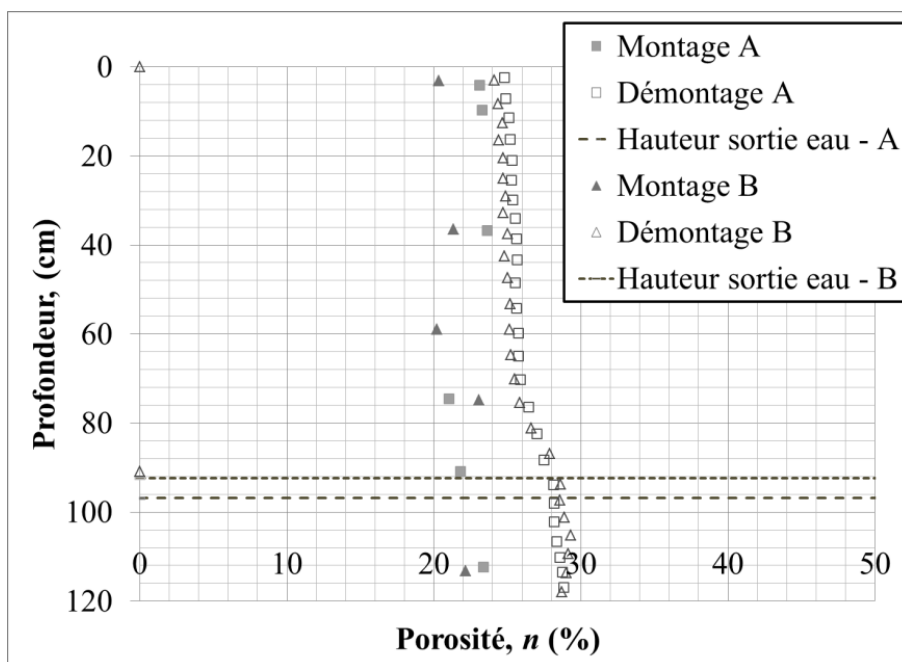


Figure 5.4 : Profondeur de la position de l'eau libre créée par le tube de sortie pour chacune des colonnes.

a)



b)

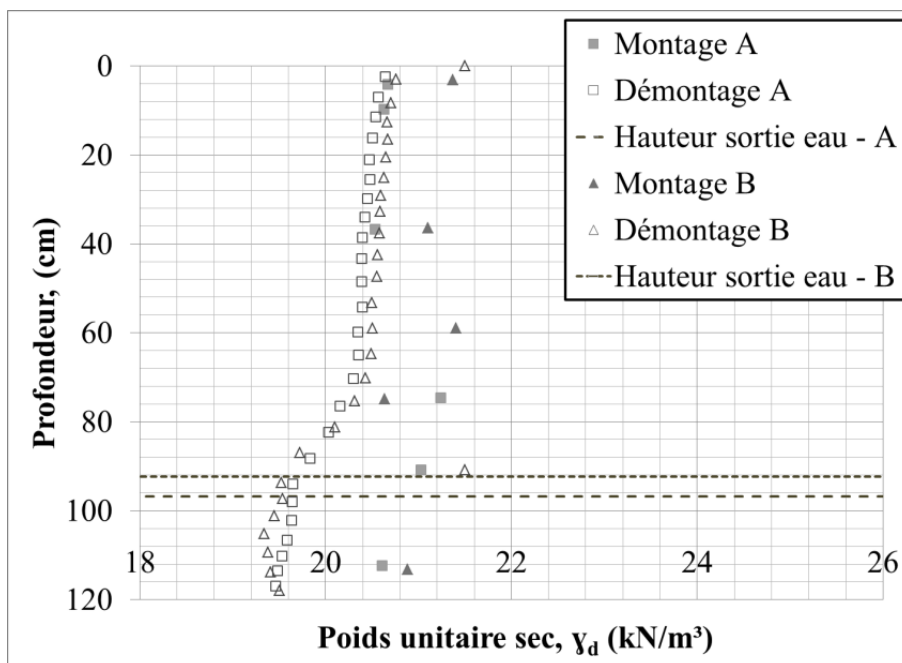
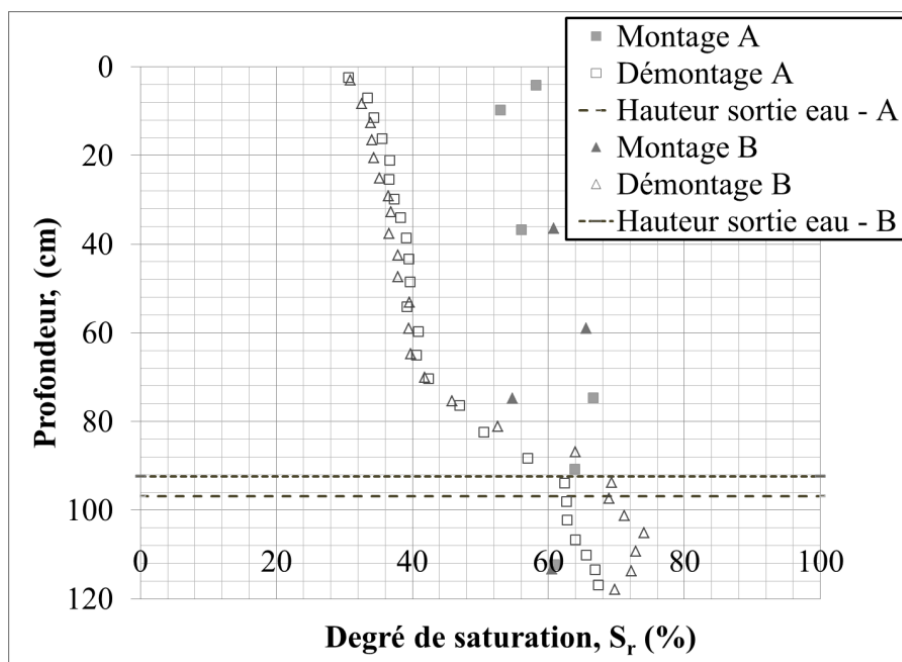


Figure 5.5 : Porosité n et poids volumique sec γ_d des roches stériles dans les colonnes A et B au montage et au démontage (en fonction de la profondeur).

a)



b)

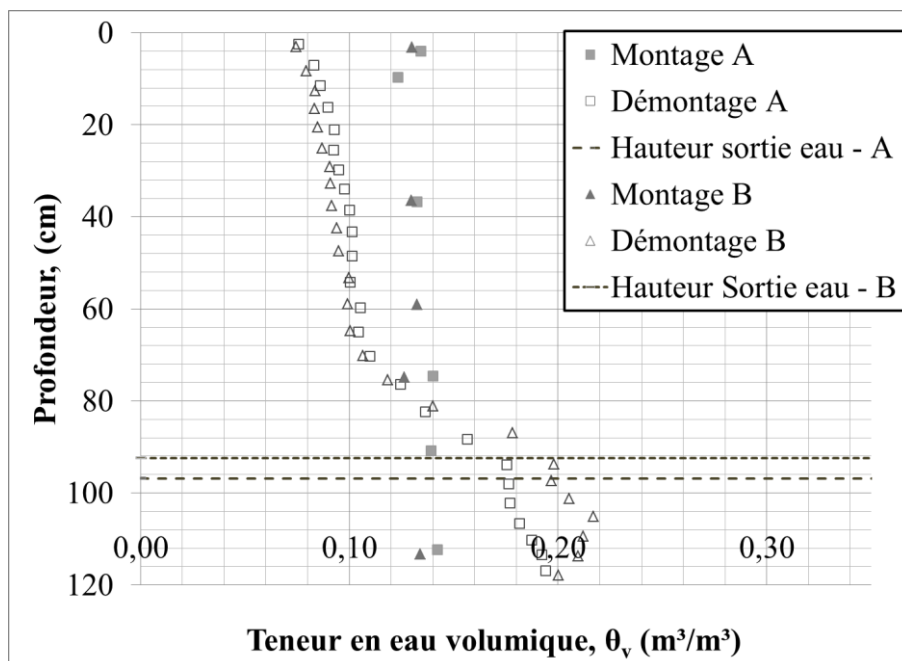


Figure 5.6 : Degré de saturation S_r et teneur en eau volumique θ_v des roches stériles dans les colonnes A et B au montage et au démontage, en fonction de la profondeur.

Cinq (5) essais de perméabilité ont été effectués dans les colonnes de roches stériles saturées avant de faire les essais de drainage. Pendant ces essais, l'eau a été récupérée à la base de chacune des colonnes et pesée à des intervalles de temps réguliers. Un total de dix (10) tensiomètres (5 par colonne) ont été placés le long de la paroi des colonnes pour lesquels les mesures de charge théoriques sont présentés au tableau 5.1. Pour suivre l'évolution de la pression/succion pendant les essais de perméabilité et de drainage. Le tableau 5.1 et la figure 5.7 présentent la localisation des tensiomètres pour les deux colonnes en relation avec la sortie #2 (voir figure 5.2) au bas de la colonne; la charge maximale théorique pour chaque tensiomètre en fonction de sa localisation et de la charge d'eau appliquée en conditions saturées.

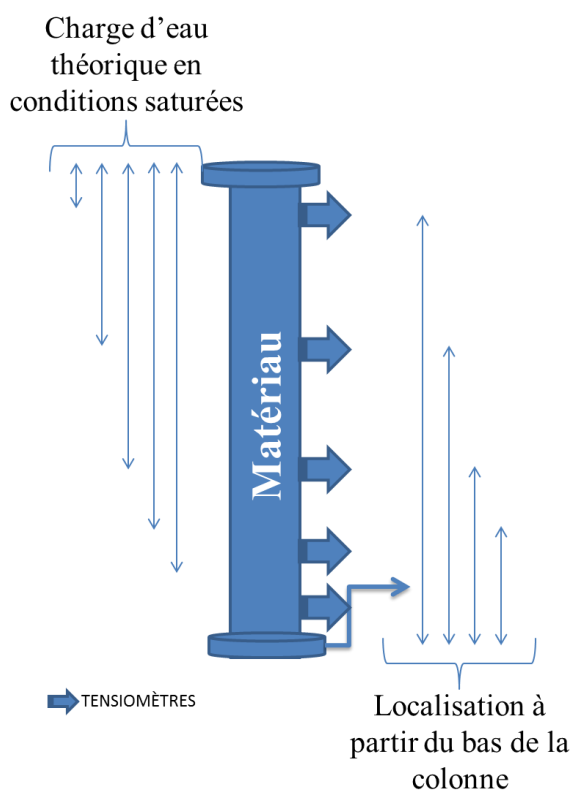


Figure 5.7 : Schéma de la localisation des mesures de pression (voir détail au tableau 5-1).

Tableau 5.1 : Localisation des tensiomètres dans les deux colonnes et charge d'eau théorique en conditions saturées à chacun des emplacements

Colonne A			Colonne B		
Identification	Localisation à partir du bas de la colonne (cm) Précision $\pm 0,2$ cm	Charge théorique en condition saturée (cm H ₂ O)	Identification	Localisation à partir du bas de la colonne (cm) Précision $\pm 0,2$ cm	Charge théorique en condition saturée (cm H ₂ O)
T10	115	12,5	T7	116	14,0
T9	77	52,5	T4	75	51,5
T8	46	84,0	T3	45	83,5
T6	26	103,0	T2	26	103,0
T5	16	113,0	T1	16	112,5

5.1.1 Essais de perméabilité

Trois essais de perméabilité ont été faits dans la colonne A et deux essais dans la colonne B. La sortie de l'eau se fait au-dessus du géotextile (sortie #1) afin de mesurer la conductivité hydraulique du matériau. Les essais ont été effectués à l'aide d'une colonne d'eau désaérée où un tube a été inséré pour en faire une bouteille de Mariotte et obtenir une charge d'eau constante pendant les essais. Puisqu'il y avait quelques bulles d'air dans le tube et que l'eau désaérée avait été exposée à l'air quelques instants, les essais ont d'abord été effectués à charge variable jusqu'à ce que le système de Mariotte soit en équilibre et fournisse une charge constante pendant les essais de perméabilité. Seulement les essais effectués dans la colonne A sont présentés en détails car la charge constante a été atteinte plus facilement lors de ces essais.

La colonne B (essais #1 et #2) n'était pas à l'équilibre avant de démarrer l'essai, donc les résultats ne sont pas présentés ici et détails et se trouvent aux annexes B et J. Pour les essais de perméabilité effectués dans la colonne A le gradient hydraulique moyen, i était de 1,25 pour les trois essais à charge constante. Les mesures enregistrées par les tensiomètres pendant les essais de perméabilité à charge constante permettent d'observer l'évolution de la pression en fonction de la profondeur et du temps puisque le début de l'essai était à charge variable à la

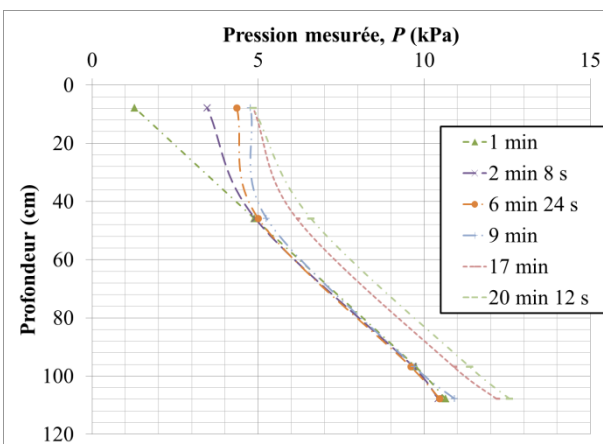
figure 5.9 a) et c). Le datum pour la profondeur est situé à la surface du matériau (roches stériles) dans la colonne.

Pour chaque essai de perméabilité (essais #3, #4 et #5), trois graphiques sont présentés aux figures 5.10 à 5.12 (a à c). Le premier graphique (a) présente le volume d'eau drainé (Q en cm^3) pendant l'essai en fonction du temps; le débit est calculé par la relation affichée sur cette figure. Le deuxième graphique (b) présente le calcul de la conductivité hydraulique non saturée corrigée à 20°C (k_{20} en cm/s) (voir équation 3-11) pendant l'essai en fonction du temps qui s'écoule; la conductivité hydraulique se stabilise après environ 180 secondes (environ 3 minutes) autour de $1,45 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ (voir figures 5.10 à 5.12 et tableau 5.2). Le dernier graphique (c) présente les valeurs de pression d'eau mesurées par les tensiomètres selon la profondeur du matériau dans la colonne et le temps. Les valeurs corrigées avec la méthode de Mualem (1976) pour un degré de saturation de 100% sont présentés au tableau 5.2.

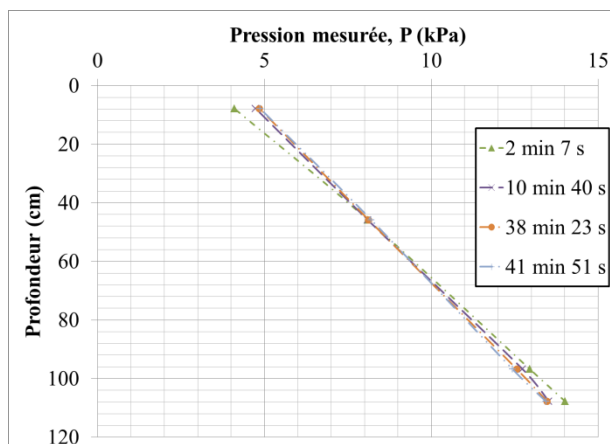
À noter ici que les tensiomètres peuvent avoir un délai de réponse pour la mesure de la pression d'eau. Aussi, le matériau dans la colonne n'était pas à saturation, donc la conductivité hydraulique mesurée (avant correction) devrait être plus faible que celle obtenue des prédictions et des essais de perméabilités en cellule à parois rigides. L'effet du degré de saturation maximale de 70% a un impact sur les pressions mesurées.

Les résultats obtenus avec la colonne B sont présentés à l'annexe B.

a) Essai #3 : Charge constante et variable



b) Essai #4 : Charge constante



c) Essai #5 : Charge constante et variable

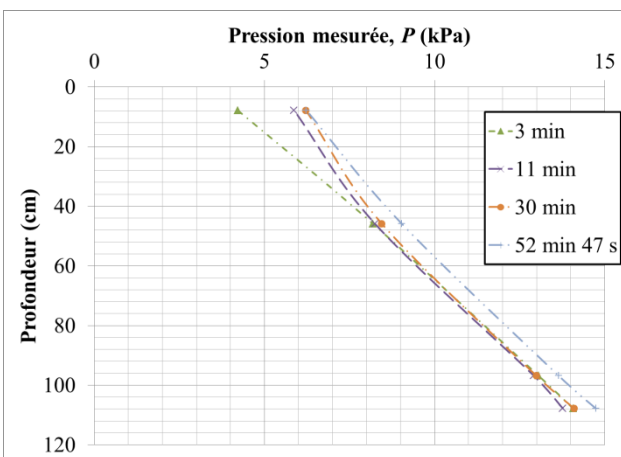
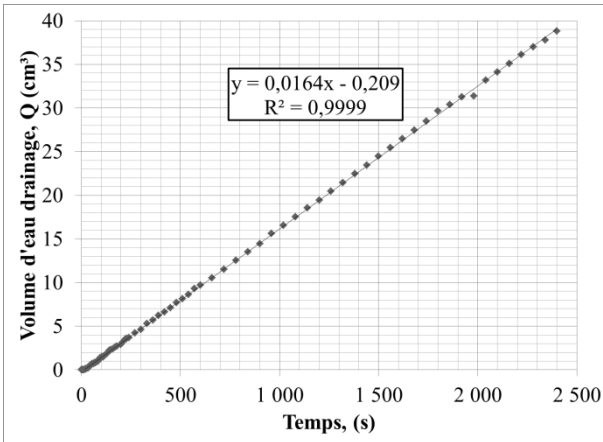
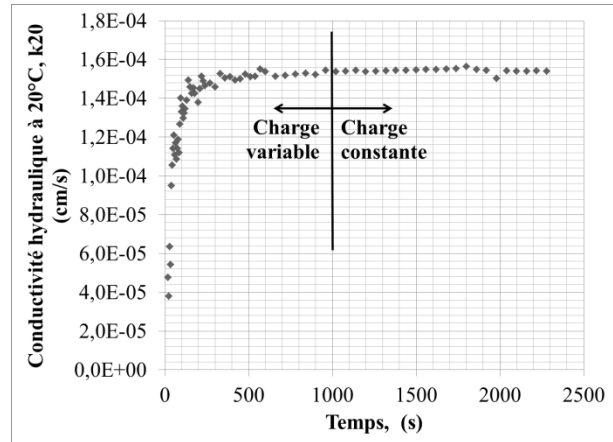


Figure 5.8 : Pression mesurée dans la colonne pendant les essais de perméabilité réalisés dans la colonne A.

a)



b)



c)

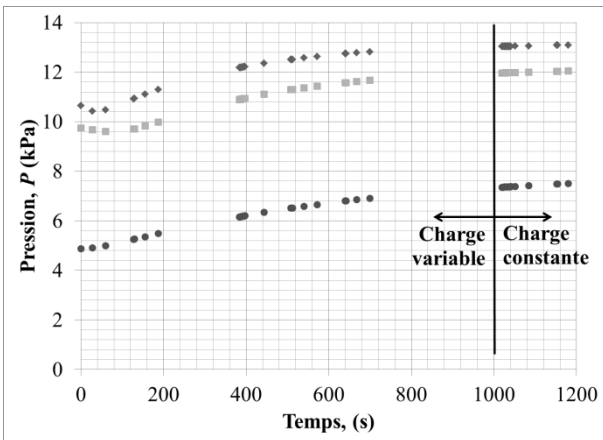


Figure 5.9 : Principales mesures pour l'essai de perméabilité #3 mené à charge variable et constante (de 146,5 cm) pour la colonne A : a) Volume d'eau de drainage à la sortie en fonction du temps, b) Valeur de la conductivité hydraulique corrigée à 20°C, c) Pression mesurée par les tensiomètres à différentes hauteurs en fonction du temps.

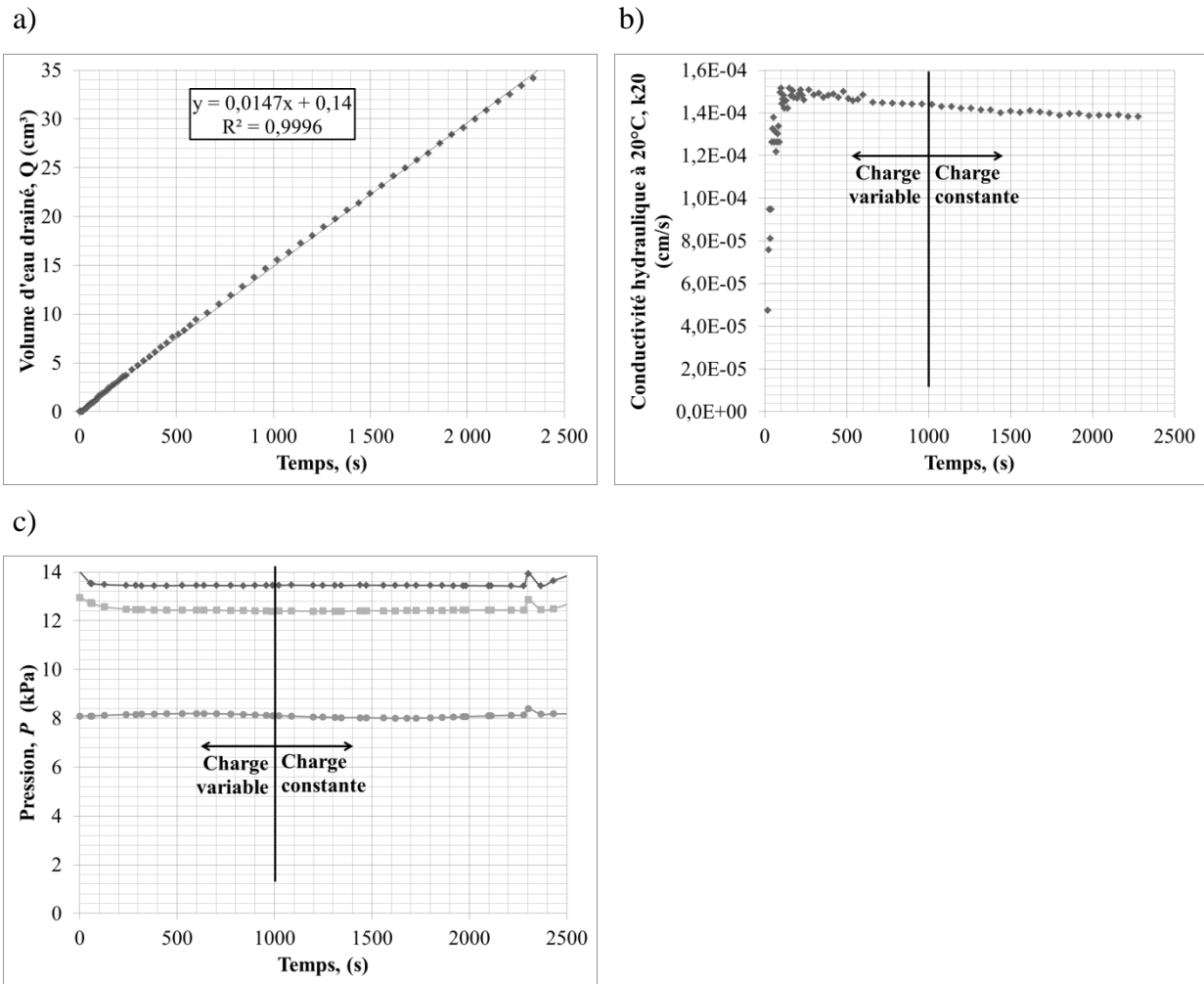


Figure 5.10 : Principales mesures pour l'essai de perméabilité #4 mené à charge variable et charge constante (de 147,1 cm) pour la colonne A: a) Volume d'eau de drainage à la sortie en fonction du temps, b) Valeur de la conductivité hydraulique corrigée à 20°C, c) Pression mesurée par les tensiomètres à différentes hauteurs en fonction du temps.

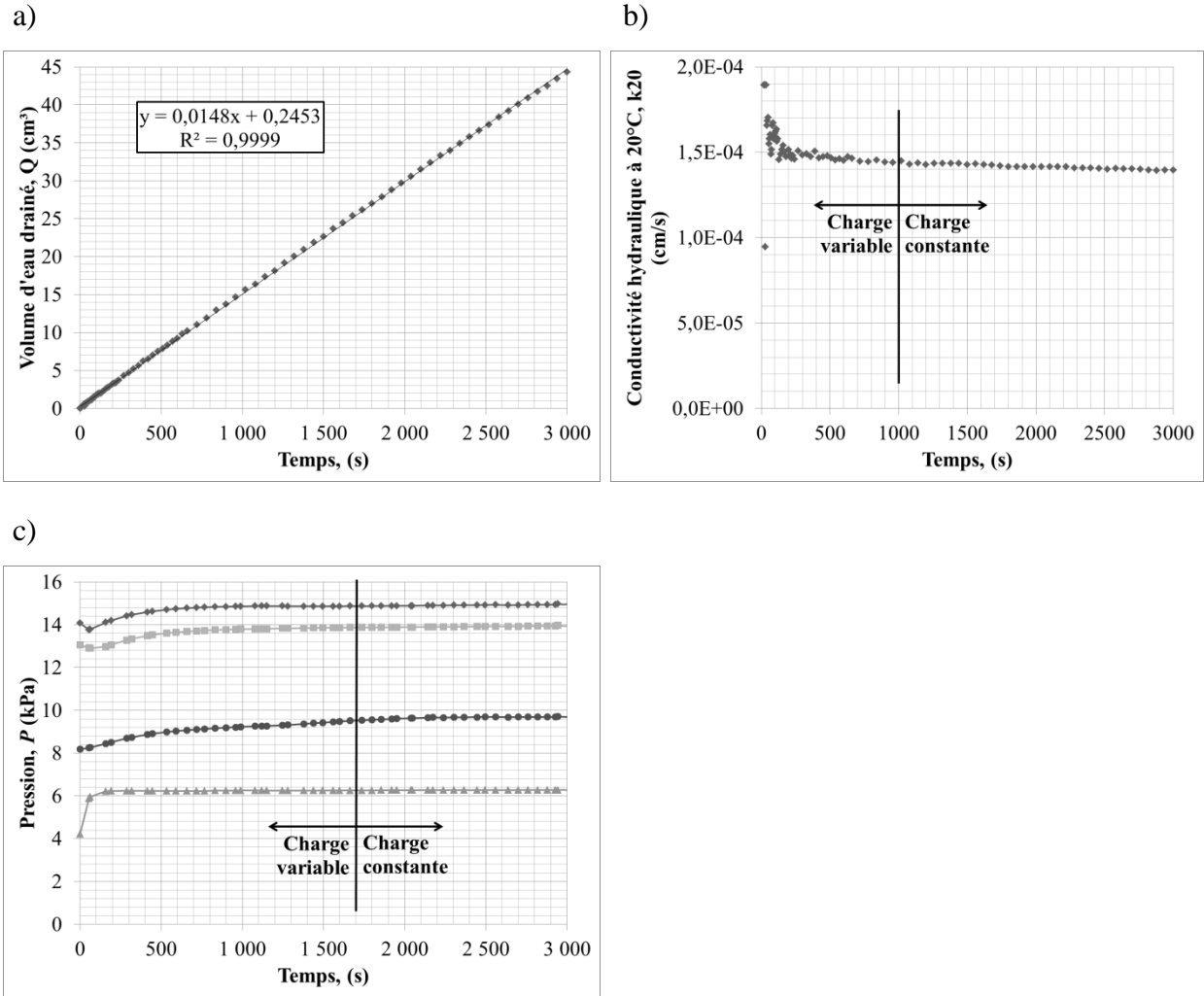


Figure 5.11 : Principales mesures pour l'essai de perméabilité #5 mené à charge variable et charge constante (de 147,1 cm) pour la colonne A: a) Volume d'eau de drainage à la sortie en fonction du temps, b) Valeur de la conductivité hydraulique corrigée à 20°C, c) Pression mesurée par les tensiomètres à différentes hauteurs en fonction du temps.

Les résultats des essais de perméabilité à charge constante effectués dans les colonnes A et B ont été compilés dans le tableau 5.2. Les calculs sont basés sur les résultats présentés dans les figures 5.9, 5.10 et 5.11 (avec aire, $A = 161,96 \text{ cm}^2$, et longueur de l'échantillon, $L = 120,5 \text{ cm}$). Les conductivités hydrauliques saturées rapportées par Peregoedova (2012) avaient des valeurs entre 10^{-1} et 10^{-3} cm/s pour un matériau semblable ayant une distribution granulométrique entre 0-50 mm de diamètre. Les conductivités hydrauliques saturées prédites par les modèles de prédiction de Mbonimpa et al. (2002) [KCM], et Chapuis et Aubertin (2003) [KC] sont de $2,0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ et $2,8 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, respectivement (voir section 3.3). Les essais de perméabilité standards rapportés à la section 3.3 ont mesuré une conductivité hydraulique saturée (selon Mualem, 1976) moyenne de $3,4 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$. L'écart est faible entre les valeurs prédites ou mesurées par d'autres en relation avec les valeurs obtenues au tableau 5.2 avec les essais effectués dans les colonnes A et B. La relation de Mualem (1976) présentée avec l'équation 3-12 a été utilisée pour convertir les conductivités hydraulique présentées au tableau 5-2 aux conditions saturées avec un S_e de 15%. Quelques relations sont observées de figures présentées précédemment :

- Débit constant pour les trois essais de perméabilité (voir pente des relations linéaires sur les figures 5.10a, 5.11a et 5.12a)
- Les essais sont considérés comme étant à charge constante après 1 000 s pour les essais #3 et #4 (figures 5.10b et 5.11b) et après 1 700 s pour l'essai #5 (figure 5.12b).

Tableau 5.2 : Résultats des essais de perméabilité à charge constante dans les colonnes

Essai	Différence de charge, Δh (cm)	Débit moyen, q_{moy} (cm^3/s)	Conductivité hydraulique corrigée pour valeur à saturation k_{sat} (cm/s) ($S_e = 15\%$)	Indice des vides moyen, e_{moy} (-)
B#1	159,1	0,040	2,2E-03	0,31
B#2	149,3	0,024	1,4E-03	0,30
A#3	150,6	0,016	5,9E-04	0,24
A#4	151,2	0,015	5,8E-04	0,24
A#5	151,2	0,015	5,9E-04	0,24

5.1.2 Essais de drainage

Pour ces essais, l'eau de la colonne draine au bas jusqu'à ce que le niveau phréatique ($u = 0$) soit niveau de la sortie (surélevée par le tube en 'Z'). La CRE peut ensuite être déterminée à l'aide du profil de teneur en eau, θ_v , versus la hauteur du matériau dans la colonne lors du démontage (en condition d'équilibre des pressions – voir section 5.1.1). Les figures 5.13 et 5.14 présentent la variation de la pression/succion mesurée en fonction de la hauteur dans la colonne pour divers temps.

Initialement, le profil est à l'équilibre hydrostatique pour la colonne de roches stériles saturées. Lorsque la valve est ouverte au bas de la colonne, l'eau commence à s'écouler et la pression diminue. Avec le temps, la pression varie sur toute la hauteur de la colonne. À la fin de l'essai, la pression au niveau de la nappe d'eau artificielle créée par le tube en 'Z' est de zéro (0). Les tensiomètres T4, T7 et T8 n'ont pas mesuré des valeurs valides, donc les mesures obtenues de ces tensiomètres ne sont pas présentées. Le tensiomètre T7 coulait, le tensiomètre T8 n'a pas été bien calibré et le tensiomètre T4 ne fournissait pas de données. Puisque l'eau s'écoule à travers la pierre poreuse les mesures de débits présentés aux figures 5.13b et 5.14b ne représentent pas les caractéristiques du matériau.

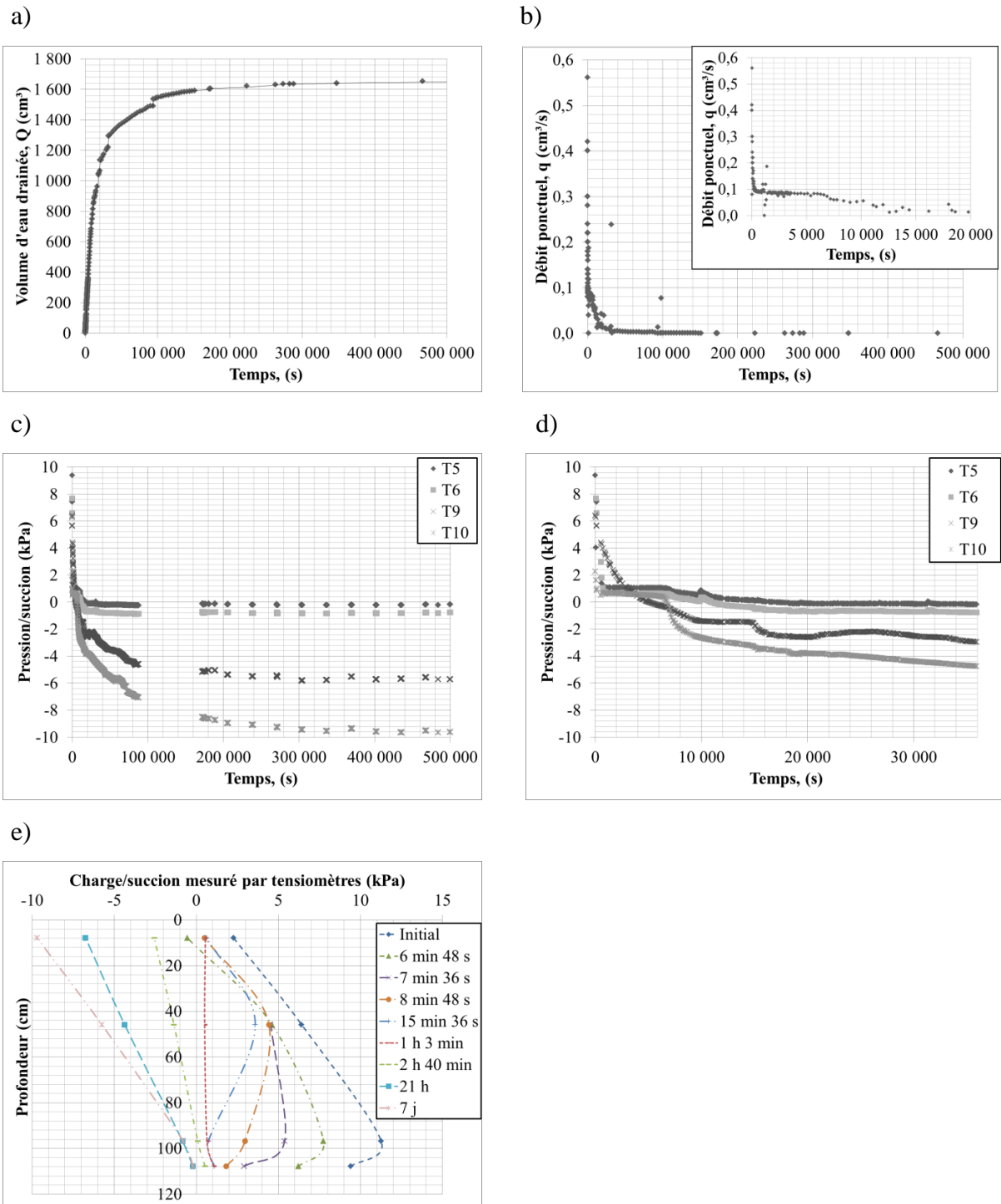


Figure 5.12 : Essai de drainage colonne A : a) Volume cumulatif d'eau drainée, b) Débit de drainage mesuré en fonction du temps, c) Mesures des tensiomètres durant tout l'essai, d) Mesures des tensiomètres les 10 premières heures, e) Profil de la charge (+) et de la succion (-) mesurée à plusieurs temps sur la profondeur de la colonne.

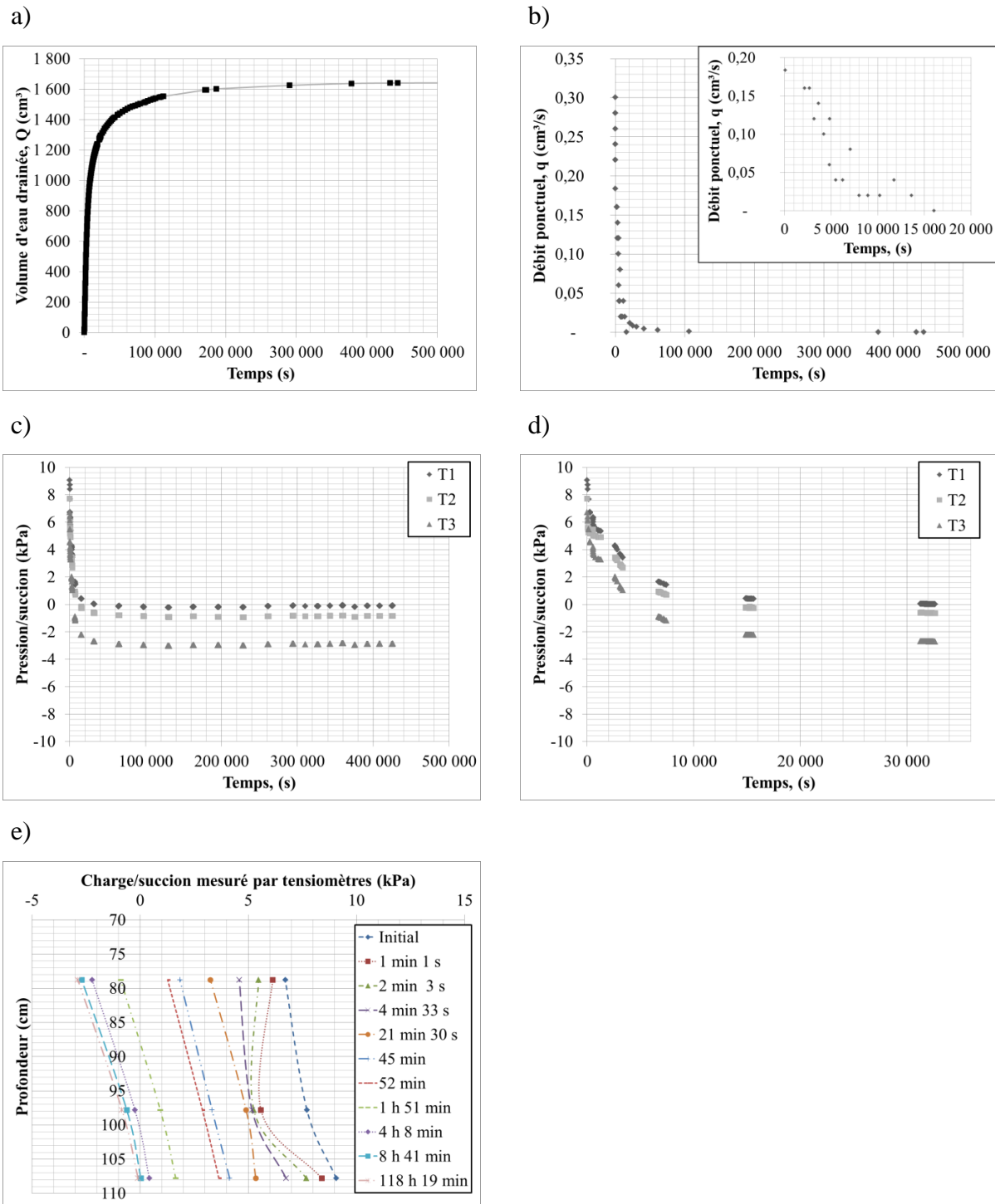


Figure 5.13 : Essai de drainage colonne B: a) Volume cumulatif d'eau drainée, b) Débit de drainage mesuré en fonction du temps, c) Mesures des tensiomètres durant tout l'essai, d) Mesures des tensiomètres les 10 premières heures, e) Profil de la succion mesurée à plusieurs temps sur la profondeur de la colonne.

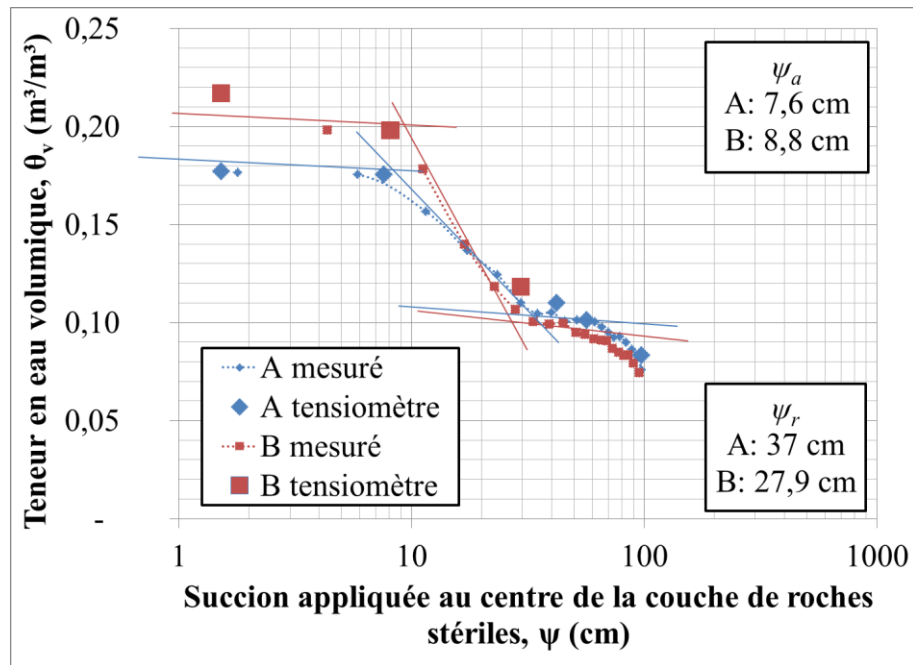
Au démontage des colonnes, les valeurs des teneurs en eau, w , et des volumes V_T de chaque couche ont permis d'évaluer la CRE lorsque ces résultats sont combinés avec les mesures aux tensiomètres. La teneur en eau volumique, θ_v , au démontage a été évaluée en fonction des relations suivantes.

$$\theta_v = w (1-n) D_r = V_w/V_T = n S_r \quad (5-1)$$

Les mesures au démontage et les lectures aux tensiomètres sont présentées à la figure 5.15. La charge de pression appliquée dans les roches stériles représente la hauteur du matériau au-dessus de la nappe d'eau dans chaque colonne. La méthode des tangentes a été appliquée aux graphiques de la figure 5.15 afin d'évaluer la valeur d'entrée d'air ψ_a [AEV] et la valeur d'entrée d'eau ψ_r [WEV]. Les CRE des colonnes A et B ont été montrées sur la figure 5.15. À noter que les mesures effectuées au bas des colonnes sont peu précises car il est difficile de bien collecter l'échantillon et toute l'eau associée dans ces conditions.

On note aussi que ces stériles n'ont pas atteint la teneur en eau résiduelle durant ces essais; cette condition aurait nécessité une plus longue période de temps (et une zone saturée au bas de la colonne).

a) Échelle semi-logarithmique



b) Échelle arithmétique

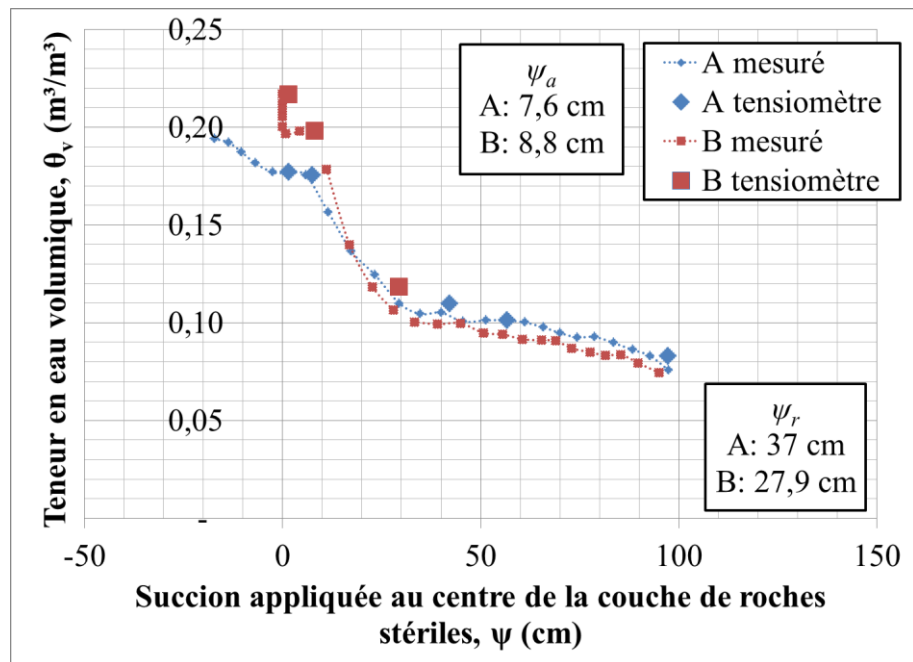


Figure 5.14 : Mesures des teneurs en eau volumique θ_w et valeurs de la succion d'entrée d'air [$\text{AEV} \equiv \psi_a$] et résiduelle [$\text{WEV} \equiv \psi_r$] des roches stériles pour chacune des colonnes A et B.

Les résultats de ces mesures ont été lissés selon le modèle de van Genuchten (1980) avec le logiciel RETC (van Genuchten et al., 1991) pour obtenir la CRE. Les données lissées permettent de déduire avec la méthode des tangentes (voir figure 5.16) la pression d'entrée d'air (ψ_a), la teneur en eau résiduelle (θ_r) et la succion à cette teneur en eau (ψ_r).

Le code RETC permet aussi d'estimer la fonction de conductivité hydraulique en fonction des données obtenues en laboratoires. Le résultat du code RETC est présenté à la figure 5.16 pour les deux colonnes. L'équation de van Genuchten (van Genuchten et al. 1991) est présentée aux équations 5-2 et 5-3. Les coefficients de van Genuchten qui ont été utilisés par le logiciel RETC sont présentés au tableau 5-3.

$$S_e = 1/[1 + (\alpha h)^{n_v}]^{m_v} \quad (5-2)$$

$$K(S_e) = K_s S_e^t [1 - (1 - S_e^{1/m_v})^{m_v}]^2 \quad (5-3)$$

Où :

S_e : saturation effective (voir équation 2-6), [-]

α_v , n_v et m_v : constantes empiriques de forme [-],

$$\text{et } m_v = 1 - 1/n_v$$

Tableau 5.3 : Propriétés de rétention d'eau et paramètres de la CRE selon les essais en colonnes et ajustés avec le code RETC (van Genuchten et al. 1991)

Colonne	θ_s labo (\approx porosité n)	α_v ajusté RETC	coefficient n_v ajusté RETC
	[-]	[cm ⁻¹]	[-]
A	0,18	0,068	2,47
B	0,20	0,071	2,86

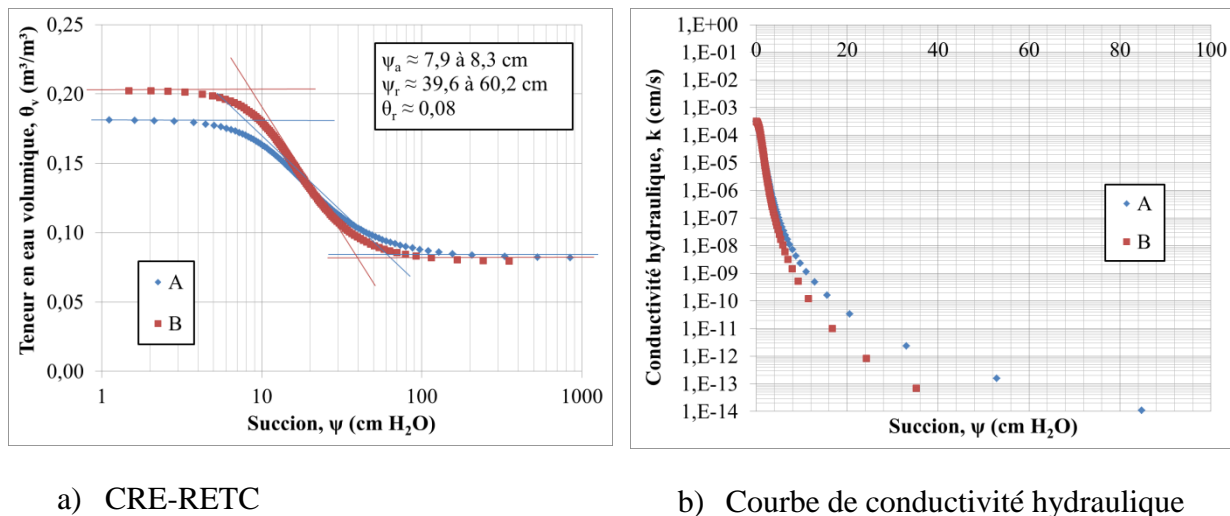
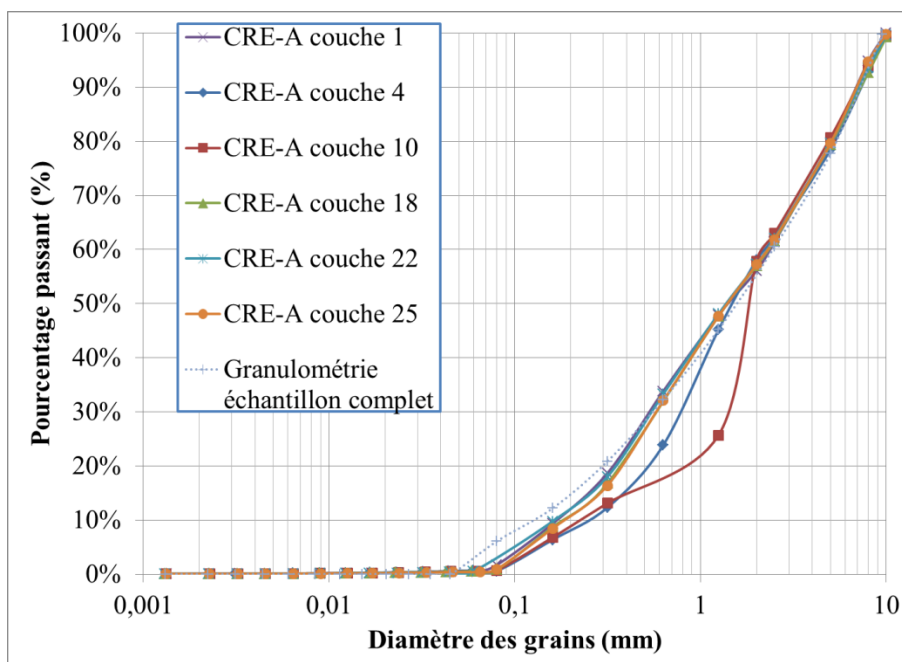


Figure 5.15 : Courbes de rétention d'eau et fonctions de conductivité hydraulique obtenues avec le modèle van Genuchten-Mualem pour les essais de drainage des colonnes A et B à (l'aide du code RETC van Genuchten et al., 1991).

5.1.3 Distribution granulométrique

Des mesures de la distribution granulométrique ont été effectuées sur plusieurs couches du matériau dans chacune des colonnes au démontage. Les résultats sont montrés aux figures à la figure 5.17. La granulométrie complète représente l'échantillon avant les essais. Lorsqu'on observe les courbes granulométriques, il semble y avoir eu un déplacement des particules à l'intérieur des colonnes pour les grains ayant un diamètre entre 0,07 mm et 2 mm. Aucun sédiment n'a toutefois été observé dans l'eau de drainage.

a) Colonne A



b) Colonne B

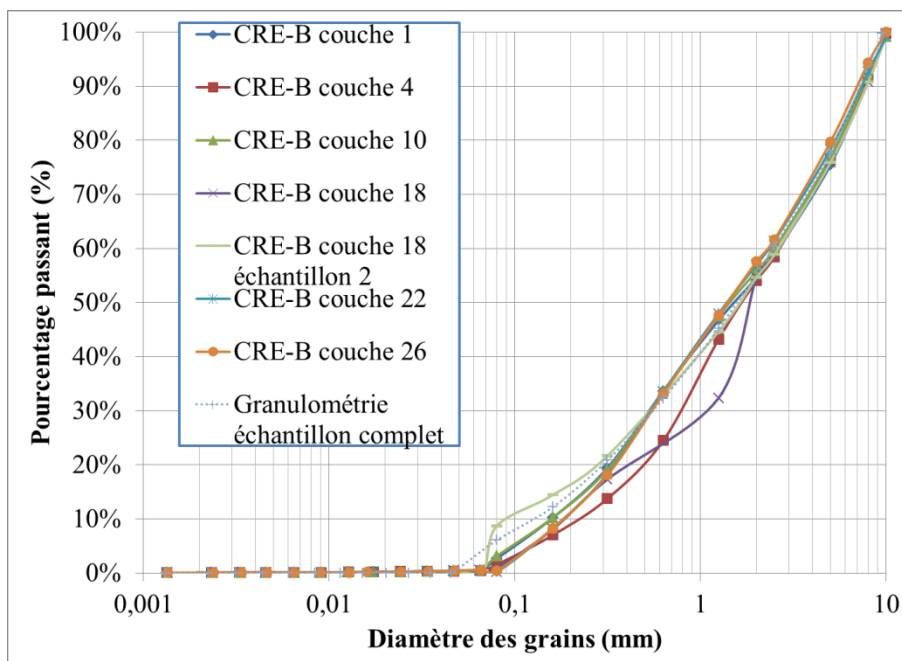


Figure 5.16 : Distribution granulométrique des roches stériles lors du démontage des colonnes.

5.2 Essais en cuve

Les essais en cuve ont pour objectif de caractériser à l'échelle intermédiaire les écoulements à travers les roches stériles à différents degrés de compactage. Ces résultats ont été comparés à ceux obtenus par modélisation numérique. La cuve en acier utilisée pour les essais a un diamètre de 91 cm et une profondeur de 91,5 cm. Le diamètre de l'exutoire est placé à 3 cm du fond de la cuve sur la paroi verticale est de 2,5 cm (voir figure 5.18). Les éléments principaux utilisés pour les essais sont identifiés sur la figure 5.18. Le compactage du matériau s'est fait au niveau du plancher sur un tapis de caoutchouc pour absorber les chocs et éviter que la cuve ne rebondisse sur le béton. Ensuite, la cuve a été surélevée sur les palettes de bois pour que l'eau de drainage puisse s'écouler dans un récipient au bas de la cuve. L'eau du baril d'eau, placée sur une table plus élevée que la cuve, s'écoule vers la cuve à l'aide d'un tuyau flexible. L'eau s'écoule à travers les roches stériles jusqu'au point de sortie au bas de la cuve où elle est récupérée dans un récipient et pompée à l'aide de pompes péristaltiques jusqu'au baril d'accumulation de l'eau de drainage qui est placé sur une balance. La balance située sous le baril est reliée à l'ordinateur pour l'enregistrement des données de poids à mesure que l'eau s'y accumule.

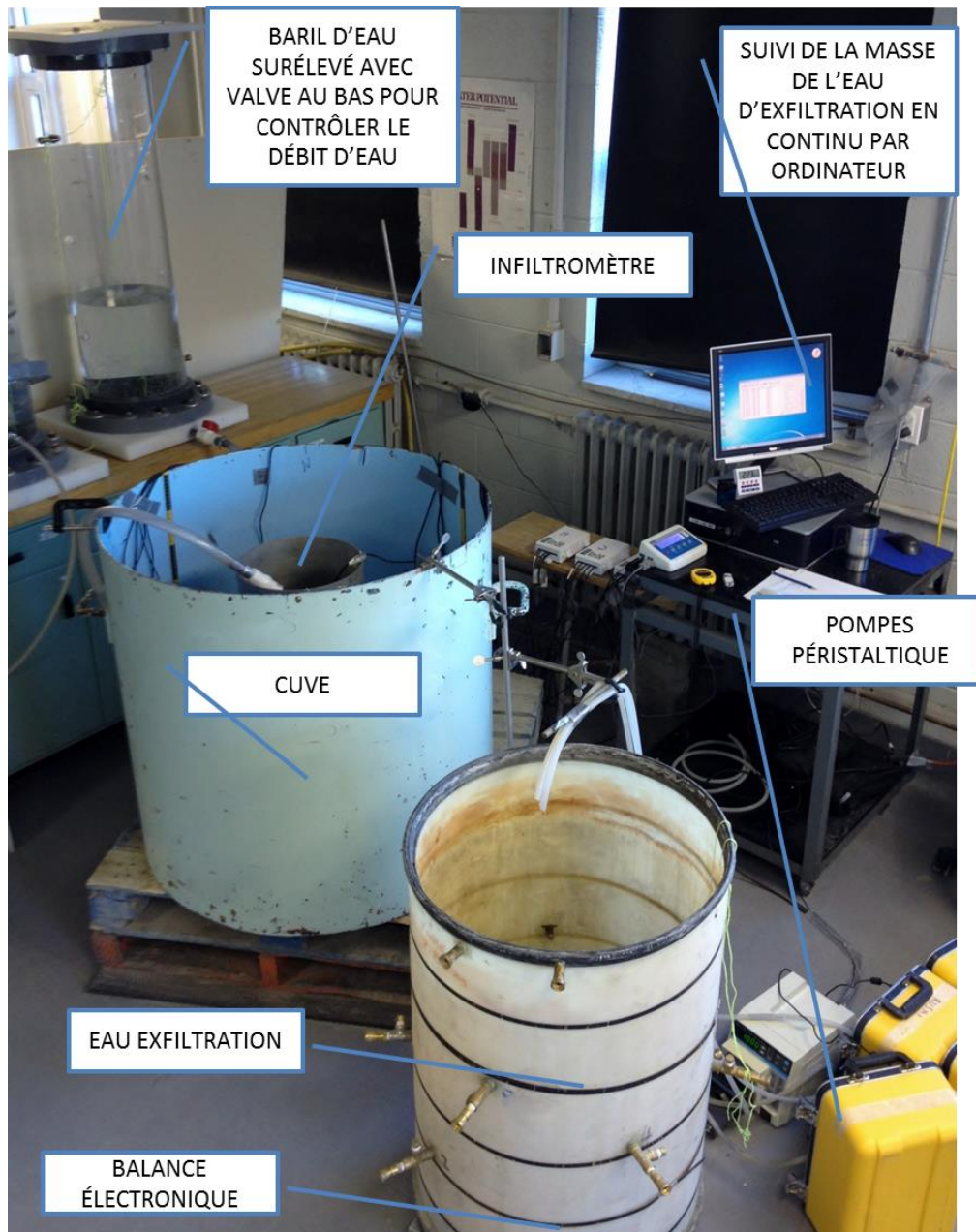


Figure 5.17 : Photo des principaux éléments constituant des essais de drainage en cuve

Le protocole décrit à la section 4.1 a été suivi pour tous les montages et essais. La totalité des roches stériles disponible, a été utilisée pour chaque montage, ce qui équivaut à près de 350 kg.

La teneur en eau volumique θ_v dans les roches stériles pendant les essais a été mesurée localement par les sondes diélectriques (tels que décrit à la section 4.1). La numérotation des sondes a été appliquée en fonction du type de sonde utilisé : pour une sonde Decagon Echo5, la numérotation débute par ‘E’ (exemple : E-11); pour une sonde Decagon 5TM la numérotation débute par un ‘T’ (exemple : T-2); pour une sonde Decagon GS3 la numérotation débute par ‘G’ (exemple : G-2).

La calibration des sondes a été effectuée avec le matériau utilisé pour les essais comme décrit à la section 2.6. Les résultats de la calibration des sondes diélectriques en fonction des roches stériles sont présentés à l’annexe C1. La calibration des sondes utilisées pour mesurer les pressions d’eau est présentée à l’annexe C2.

Le compactage du matériau dans la cuve a été effectué en disposant cette dernière sur un tapis de caoutchouc permettant d’absorber en partie les impacts. Le diamètre du disque de compactage est de 45 cm (la moitié du diamètre de la cuve) et la masse est de 11,8 kg. Lorsque le montage de chacune des cuves était complété, la cuve a été soulevée avec un trépied d’une capacité de 2 000 kg pour être ensuite placée sur deux étages de palettes en bois, sur le tapis de caoutchouc (voir figure 5.18). Le rehaussement de la cuve par rapport au niveau du plancher permet d’ajuster l’exutoire au bas de la cuve pour un écoulement vers le bas.

L’infiltromètre à paroi simple, d’un diamètre interne de 30,2 cm, a été enfoncé dans le matériau au centre de la cuve jusqu’à une profondeur variant entre 6,0 cm et 7,6 cm (essai M1 à 7,6 cm, M2 à 7,5 cm, M3 à 6,0 cm, voir tableau 5.4). L’eau d’exfiltration est récupérée dans un contenant à l’exutoire au bas de la cuve. La quantité d’eau s’accumulant dans ce contenant est comptabilisée à plusieurs intervalles de temps afin de déterminer le volume et le débit d’eau exfiltré, comme décrit à la section 4.1.2.

Les essais d’infiltration et de drainage ont été effectués sur trois montages M1, M2 et M3 dans la cuve. Chaque montage a été préparé de façon à obtenir une densité sèche ρ_d distincte. Le montage M1 est le moins dense et le montage M3 est le plus dense; le matériau du montage M2 a donc une densité sèche intermédiaire. Il est important de noter que les mesures de teneur en eau massique w et de volume sont moins précises au montage; les données présentées au

tableau 5.4 doivent être utilisées avec précaution. Les analyses ont surtout été menées avec les données récupérées au démontage des cuves.

L'eau exfiltrée a été transvidée vers des chaudières de 19 litres (5 gallons US) pour permettre la décantation des sédiments. Lorsque les sédiments sont déposés au fond des chaudières (après environ 2 à 3 semaines – lorsque l'eau est claire), l'eau claire en surface est enlevée. L'eau et les sédiments sont transvidés vers des contenants allant au four. Les sédiments sont récupérés et pesés suite à l'évaporation de l'eau. La quantité de sédiments récupérés permet de déterminer l'ampleur du lessivage des particules fines du matériau pendant l'essai. La figure 6.2 présente une compilation des quantités de sédiments recueillis et l'annexe F présente les résultats des essais au DRX effectués sur ces sédiments par l'UQAT-URSTM. Les sédiments représentent 0,09% (en poids) de l'échantillon total. L'utilisation d'une centrifugeuse pour récupérer les sédiments plus rapidement pourrait être considérée pour de futurs essais.

Quatre (4) essais ont été effectués pour chacun des montages. Le premier [E1], troisième [E3] et quatrième [E4] essais sont à charge constante dans l'infiltromètre à paroi simple inséré au centre de la cuve; l'essai quatre [E4] est un duplicata de l'essai trois [E3]. Toutefois la cuve n'a pas été recouverte pour l'essai [E4]. Le deuxième essai [E2] est un essai de drainage en condition quasi saturée pour lequel la surface de la cuve a été remplie d'eau avec une charge (excédent d'eau) de 12 cm à 16 cm (M1 à 12 cm, M2 à 13,4 cm, M3 à 16,4 cm; voir protocole à la section 4.1 et tableau 5.4).

Les conditions générales après le montage de chacune des 3 cuves (stériles à différents degrés de compactage) sont présentées au tableau 5.4. Ces valeurs sont des moyennes globales; les valeurs obtenues au montage M1 ne sont pas aussi précises que celles obtenues aux montages M2 et M3 dû à l'expérience acquise.

Dans le cadre de ce mémoire, seulement les résultats des essais en cuve en condition de drainage E2 seront présentés en détail pour chacun des montages. Les résultats pour les essais E1, E3 et E4 sont présentés à l'annexe A. Une description complète des essais d'infiltration avec l'infiltromètre est aussi présentée à titre d'exemple pour les essais M3E3 et M3E4. Les résultats des essais E2 sont analysés et modélisés au chapitre 6.

Tableau 5.4 : Conditions générales de chacun des montages des essais en cuve

	M1	M2	M3
Énergie de compactage approximative (kN-m/m³)	578	2 888	5 828
Densité sèche moyenne, ρ_{d-moy} (kg/m³)	N.D.	1 707,1	1 739,0
Teneur en eau massique moyenne, w_{moy} (%)	6,1%	4,7%	3,7%
Porosité, n_{moy} (%)	N.D.*	38%	36%
Teneur en eau volumique moyenne au montage, θ_{moy} (m³/m³)	N.D.*	0,08	0,06
Épaisseur totale des trois couches (cm)	30,6	31,2	29,5
Profondeur infiltromètre (cm)	7,6	7,5	6,0
Charge d'eau essai E2 (cm)	12,0	13,4	16,4

*Non disponible (N.D.)

5.2.1 Résultats des essais de drainage

Les conditions de base pour chacun des montages sont présentées au tableau 5.-4 (voir aussi les tableaux 5.6, 5.11, 5.16).

MONTAGE M1

Le montage M1 inclut les roches stériles avec une faible énergie de compactage (hauteur de chute du disque de trois (3) centimètres pour les trois couches). L'infiltromètre a été enfoncé dans le matériau jusqu'à environ 7,6 cm de profondeur. Le câble de la sonde située au centre de l'infiltromètre dans le matériau a été enfoui plus creux afin d'éviter qu'il y ait contact avec l'infiltromètre. Ce premier montage a permis d'établir plus spécifiquement les méthodes à adopter pour obtenir des données de qualité. Il y a eu quelques erreurs pour ce premier montage, incluant :

- le poids du matériau humide n'a pas été enregistré au montage;
- les fils des sondes diélectriques ont été rassemblés à la paroi de la cuve, ce qui a créé une zone moins dense (et craquelée). Cette zone pourrait avoir provoqué un drainage préférentiel lors des essais;

- le volume de chaque couche de roches stériles a été enregistré, mais la précision n'était pas suffisante. Seulement le volume total peut être utilisé.

Le premier essai, M1E1, a permis d'établir la méthode pour bien faire les essais d'infiltration et pour l'enregistrement des données. Les corrections apportées pour les essais subséquents sont décrites dans le tableau 5.5.

Tableau 5.5 : Méthodes d'obtention des données initiales et corrigées pour les essais d'infiltration et de drainage en cuve

Méthode initiale (essais M1E1 et M1E2)	Méthode corrigée (autres essais)
Contrôle de la charge d'eau dans l'infiltromètre à l'aide d'une ligne dessinée sur la paroi interne de l'infiltromètre.	Même contrôle visuel pour la charge d'eau, mais une sonde à pression a été ajoutée au fond de l'infiltromètre à la surface du matériau afin d'évaluer les variations de la charge d'eau après l'essai.
Mesure de la quantité d'eau à l'exfiltration avec un seau, remplacé et pesé toutes les minutes. Cette méthode est peu précise et la manipulation a mené à la perte d'eau à plusieurs reprises.	Un récipient a été placé à l'exutoire. L'eau était pompée en continu à l'aide d'une pompe péristaltique vers un baril placé sur une balance qui enregistrerait le poids aux secondes. Une sonde à pression a été placée au fond du baril pour enregistrer la charge d'eau dans le baril. Il pourrait y avoir un faible délai causé par le pompage de l'eau, mais la vitesse de drainage n'est pas affectée car l'eau était récupérée au fond du récipient en continu.
La pression barométrique n'a pas été enregistrée. Les données des essais du montage M1 ont été corrigées en utilisant des relations théoriques provenant des données climatiques d'Environnement Canada.	Une sonde à pression a été placée à l'air libre pendant les essais.

Les sondes diélectriques (Decagon EC-5, 5TM et GS3) ont été placées dans chacune des couches de matériau (voir tableau 5.6). L'emplacement est défini comme étant la distance à partir de la paroi indiquée selon le schéma en croix établi à la section 4.1 figure 4.5.

Tableau 5.6 : Localisation des sondes diélectriques pour le montage M1.

Identification	Emplacement	Élévation à partir de la surface du géotextile-datum (cm)
Bas – 1^{re} couche		
G-1	30 cm Nord	5,5
T-1	30 cm Sud	6,3
E-7	15 cm Est	4,6
E-1	Centre	5,9
E-6	15 cm Ouest	4,3
Milieu – 2^e couche		
G-2	30 cm Nord	15,8
T-2	30 cm Sud	17,8
E-8	Centre	16,2
E-9	15 cm Ouest	17,5
E-10	15 cm Est	16,3
Surface – 3^e couche		
E-11	Centre	28,8
E-12	20 cm Sud	25,2
E-13	20 cm Nord	27,2
E-14	30 cm Ouest	26,2
E-15	30 cm Est	26,5

Quelques informations n'ont pas été enregistrées pour le montage M1 (dû au manque d'expérience). Les principales données compilées sont les teneurs en eau massique (ASTM D2216-10) des roches stériles pour chaque couche de sol placé. La teneur en eau (w) moyenne était de $6,1\% \pm 1\%$. La masse sèche totale du matériau était de 342,34 kg ($\pm 0,03$ kg – précision de la balance utilisée $\pm 0,002$ kg; 15 mesures ont été prises) dans la cuve pour un volume de $192\,518\text{ cm}^3$ ($\pm 2\text{ cm}^3$) sur une épaisseur de 30,6 cm (± 2 cm selon écart type moyen).

Les paramètres de base pour chacun des essais d'infiltration (E1, E3 et E4) et l'essai de drainage (E2) sont présentés au tableau 5.4. L'effort de compactage total appliqué sur le matériau est de $578\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ ($641\text{ kJ}/\text{m}^3$), selon la méthode de calcul présenté par l'équation 4-1. Le gradient hydraulique moyen est défini comme étant la charge moyenne appliquée,

H_{moy} , divisée par l'épaisseur du matériau, 29,6 cm. Le datum est la surface du matériau au fond de l'infiltromètre qui est l'interface entre l'eau et le matériau.

Tableau 5.7 : Caractéristiques des essais réalisés avec le montage M1

Identification des essais*	Type d'essai d'infiltration, Aire d'infiltration (cm ²)	Charge avec écart type et gradient moyen
M1E1	Charge constante, Infiltromètre (716 cm ²)	$H_{moy} = 3$ cm, $i_{moy} = 0,1$
M1E2	Charge variable, Cuve (6 504 cm ²)	$H_{max} = 12$ cm, $i_{max} = 0,41$
M1E3	Charge constante, Infiltromètre (716 cm ²)	$H_{moy} = 1,9 \pm 0,6$ cm, $i_{moy} = 0,06$
M1E4 (duplicata M1E3)		$H_{moy} = 2,7 \pm 0,6$ cm, $i_{moy} = 0,09$

*Montage (M), Essai (E)

ENREGISTREMENT DES DONNÉES ET MESURES DES DÉBITS D'INFILTRATION

Trois méthodes d'enregistrement des données d'infiltration ont été appliquées au premier essai d'infiltration en cuve (M1E1). Chaque méthode est décrite ici avec les avantages et limitations de chacune; les résultats obtenus avec chacune des méthodes est présenté à la figure 5.18.

- i) Burettes de chaque côté de la colonne d'eau d'alimentation :

On mesure la charge instantanée, mais il est difficile de faire une lecture précise de la valeur à un temps fixe puisque la charge est constamment en mouvement. Une burette suffisamment longue doit être utilisée pour enregistrer les données pendant tout l'essai. Précision inconnue.

- ii) Balance sur laquelle la colonne d'eau d'alimentation est posée :

La masse est enregistrée par un système d'acquisition de données électroniques selon un intervalle de temps choisi. La précision de la balance est de +/- 2 g.

- iii) Sonde à pression placée dans le fond de la colonne d'eau d'alimentation:

On enregistre la charge d'eau selon l'intervalle de temps choisi. Les données peuvent être extraites après l'essai. Elles sont converties selon la pression barométrique ambiante afin d'obtenir la charge (précision $\pm 1,0$ cm). Ces sondes à pression sont peu utiles lorsque la charge d'eau est faible dû à leur faible précision.

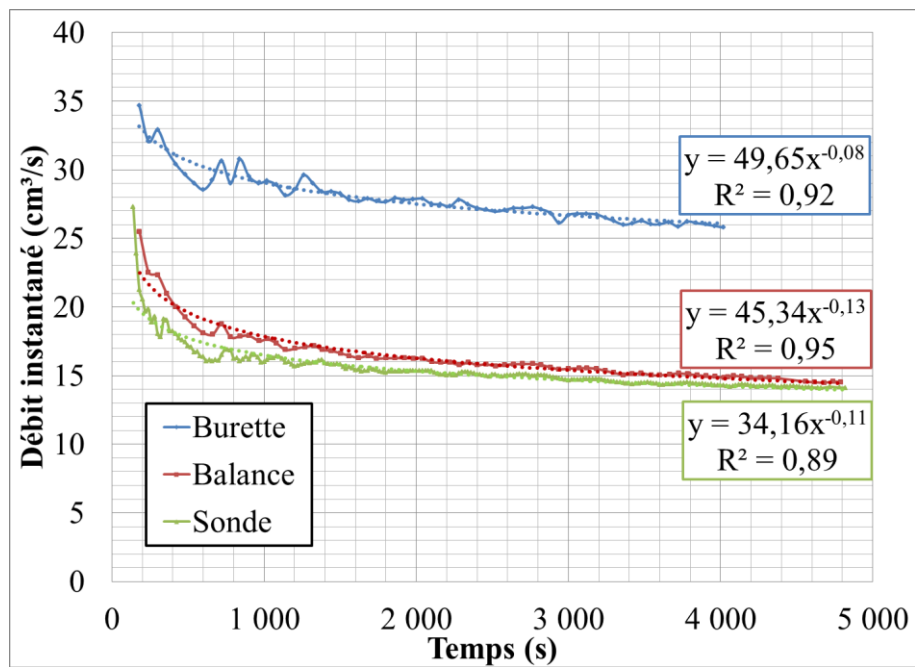
SOMMAIRE DES RÉSULTATS POUR M1E1

Les résultats obtenus des trois méthodes utilisées pour mesurer les débits de volume d'eau d'infiltration (figure 5.18a) suggère que les mesures obtenues avec la balance et la sonde à pression sont plus représentatives. On peut observer sur la figure 5-18a que les mesures prises avec la burette varient substantiellement d'une mesure à l'autre. Les mesures prises avec la balance montrent plus de stabilité et de constance. Les mesures prises avec la sonde à pression montrent que la précision de la sonde (± 1 cm) affecte les résultats. Il y a un assez grand écart entre les mesures (figure 5.18a) et le débit cumulatif enregistré par la sonde est beaucoup plus élevé que celui enregistré avec la burette et la balance (voir figure 5.18b et tableau 5.8).

Tableau 5.8 : Volumes mesurés avec chacune des méthodes à la fin de l'infiltration; on présente aussi le volume mesuré à l'exfiltration.

Méthode de mesure	cm ³
Infiltration burette	103 649
Infiltration sonde	67 922
Infiltration balance	69 642
Exfiltration balance	50 154

a) Débit instantané



b) Volume cumulé

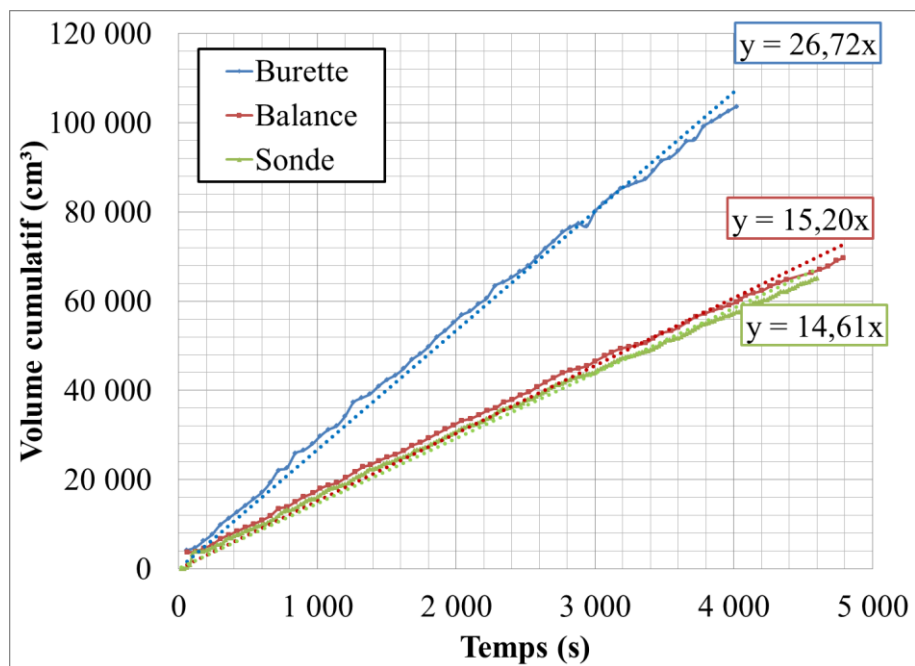


Figure 5.18 : Résultats des mesures du débit et volume d'eau d'infiltration enregistrés selon trois méthodes pendant l'essai M1E1.

Les débits d'exfiltration d'eau ont aussi besoin d'être enregistrés, mais seulement une balance ayant les capacités requises était disponible. Suite à l'essai M1E1, l'enregistrement des données d'infiltration a été réalisé avec les sondes à pression seulement; une redondance a été créée en utilisant plus d'une sonde lors de ces mesures. Les débits d'exfiltration ont été mesurés avec la balance et les sondes à pression. Le diamètre du baril qui récupère l'eau d'exfiltration est assez grand et cela limite la précision de la mesure à l'aide des sondes à pression pour l'exfiltration, d'où l'importance de l'utilisation de la balance.

SOMMAIRE DES RÉSULTATS POUR M1

Un sommaire des résultats des essais d'infiltration et de drainage est présenté au tableau 5.9. Les graphiques et détails relatifs à chacun des essais d'infiltration sont présentés à l'annexe A. Le débit maximum à l'infiltration est calculé à partir de la relation entre le volume d'eau et le temps au début de l'essai.

Le tableau 5.9 montre que pour l'essai de drainage E2 le débit maximum de drainage est plus élevé que celui de l'infiltration. Il est possible que pour les essais E2 l'eau emmagasiné dans les pores, le géotextile et le tuyau d'échappement ait un impact sur le volume d'eau calculé à la sortie de la cuve. Ce phénomène est aussi observé pour l'essai M3E2.

Tableau 5.9 : Sommaire des principaux résultats des essais d'infiltration et de drainage pour le montage M1

	E1 (infiltromètre)	E2 (drainage)	E3 (infiltromètre)	E4 (duplicata E3)
Délai avant début exfiltration au bas de la cuve	00 :20 :20	S.O.	Moins de 00 :08 :00*	00 :06 :10
Durée infiltration	01 :20 :00	01 :10 :00	01 :20 :00	01 :00 :00
Durée exfiltration	07 :25 :00	06 :02 :00	06 :15 :00	06:42 :00
Vitesse infiltration moyenne (cm/s)	0,0195	0,0033	0,01	0,0091
Vitesse exfiltration maximale (cm/s)	0,0136	0,0031	0,0025	0,0022
Débit max. infiltration, Q_{Tinf} (cm ³ /s)	14,6 à 15,2	21,4	7,3	6,6
Débit max. exfiltration, Q_{Texf} (cm ³ /s)	N.D.	22,0	6,4	5,7
Volume total infiltré, V_{Tinf} (cm ³)	69 642	S.O.	35 348	25 078
Volume total exfiltré, V_{Texf} (cm ³)	50 154	105 831	36 822	24 747

*valve de l'exutoire a été fermé pendant 8 minutes (oubli); lorsque la valve a été ouverte, l'eau s'est écoulée immédiatement

N.D. : Non disponible

SOMMAIRE DES RÉSULTATS POUR L'ESSAIS M1E2

Les détails des conditions d'essai et des résultats de l'essai de drainage M1E2 sont présentés dans ce qui suit. Cet essai de drainage a été effectué en remplissant d'abord la cuve par le bas (l'exutoire) à faible débit jusqu'à ce que le niveau d'eau en surface soit entre 10 cm et 15 cm au-dessus des roches stériles. La pression appliquée par l'eau à la surface du matériau au moment de l'ouverture de la valve à l'exutoire a été mesurée à l'aide de cinq (5) sondes à pression placées à la surface du matériau dans la cuve. L'enregistrement des données se faisait à toutes les secondes. Le début d'exfiltration a été identifié avec la balance électronique placée directement sous l'exutoire; la masse d'eau accumulée dans le récipient a été mesurés à toutes les secondes.

Les résultats des mesures des vitesses d'infiltration (axe vertical gauche) et d'exfiltration (axe vertical droite) sont présentés à la figure 5.19. Les équations d'infiltration présentées sur la figure sont linéaires pour le début de l'essai pour chacune des sondes. La pente ($m(\text{cm/s})$, de $y(\text{cm}) = m(\text{cm/s})x(\text{s}) + b(\text{cm})$) représente la vitesse d'infiltration en cm/s ; la vitesse moyenne au début de l'essai est de $0,003 \text{ cm/s}$ pour l'infiltration et l'exfiltration du temps 0 s à $3\,600 \text{ s}$. Le paramètre 'b' représente la charge initiale de l'essai qui était approximativement $12,7 \text{ cm H}_2\text{O}$ ($\pm 1 \text{ cm H}_2\text{O}$). Les sondes à pression ont été placées aux azimuts nord-sud-est-ouest de la cuve et au centre. Les mesures d'exfiltration ont été enregistrées avec la balance électronique et la masse a été convertie en charge en fonction du diamètre interne de la cuve afin de comparer des valeurs de charge qui sont équivalentes (voir figure 5.19).

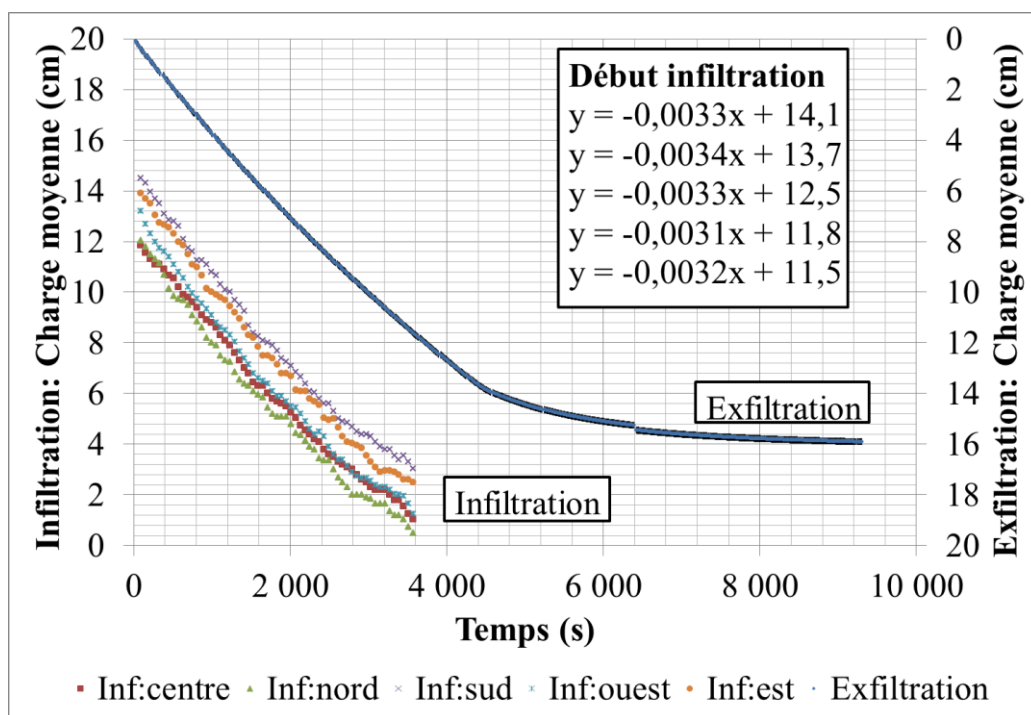


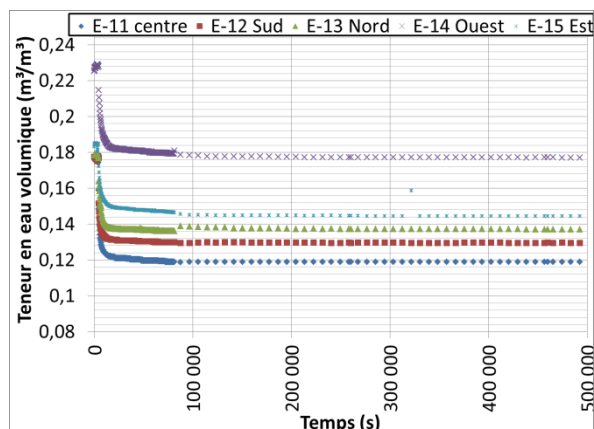
Figure 5.19 : Charge mesurée pendant l'essai de drainage M1E2 en surface (infiltration) et à la sortie (exfiltration) : les valeurs converties selon le diamètre du récipient. Infiltration : axe vertical gauche, exfiltration : axe vertical droit.

La teneur en eau volumique dans le matériau a été mesurée avec les sondes diélectriques ECH₂O calibrées (voir section 2.5 et annexe C1). Les valeurs de teneur en eau volumique θ_v mesurée pour chaque couche sont présentées en fonction du temps à la figure 5-20 (a, c, e). Les figures 5.20 (b, d, f) montrent les valeurs de teneur en eau volumique au début de l'essai pour les 4 premières heures. À noter que la sonde E-9 a été brisée; la sonde E-14 (ouest) est située là où les fils des sondes ont été joints ensemble; cette zone ne représente pas bien l'état du matériau dans la cuve.

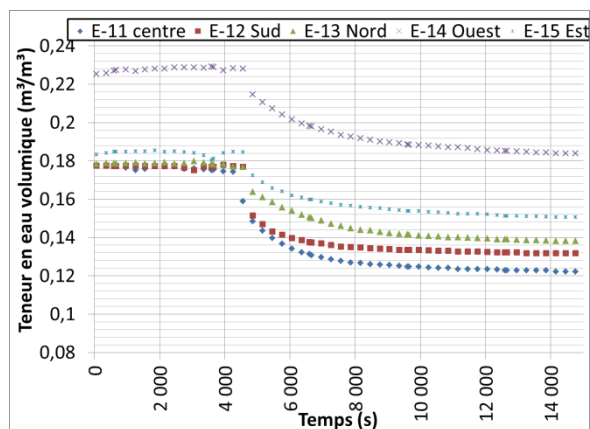
Voici quelques observations faites à partir des résultats montrés sur la figure 5.20 (a à f) :

- la couche du bas (1^e) ne se draine pas complètement pendant l'essai, ceci est montré par la teneur en eau volumique qui est élevée dans cette couche à la fin de l'essai;
- la teneur en eau volumique θ_v en surface à la fin de l'essai se situe entre 0,10 et 0,14 ($\pm 0,03$) ce qui peut être considéré comme élevé (pourrait être du à la précision de la sonde), mais le matériau est à l'équilibre;
- la teneur en eau volumique θ_v là où le degré de saturation S_r est élevé se situe autour de 0,18 ($\pm 0,03$) en surface pendant qu'il y a une charge d'eau sur le matériau, ce qui est plus faible que la porosité du matériau. Ceci implique que la matériau n'était pas complètement saturé (S_r environ à 54% selon données au démontage);
- La baisse du degré de saturation S_r et de θ_v débute à environ 3 600 secondes en surface et à 100 000 secondes en profondeur;

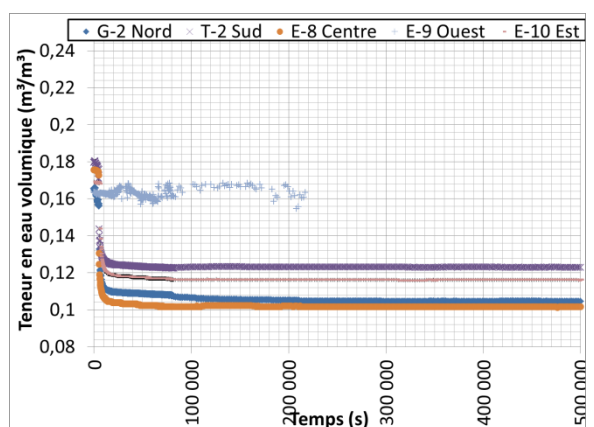
a) Surface



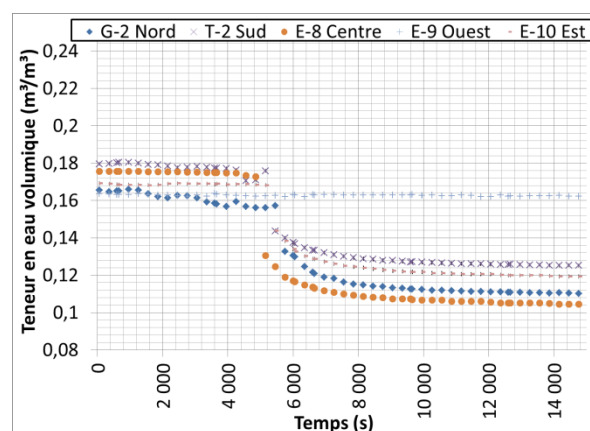
b) Surface



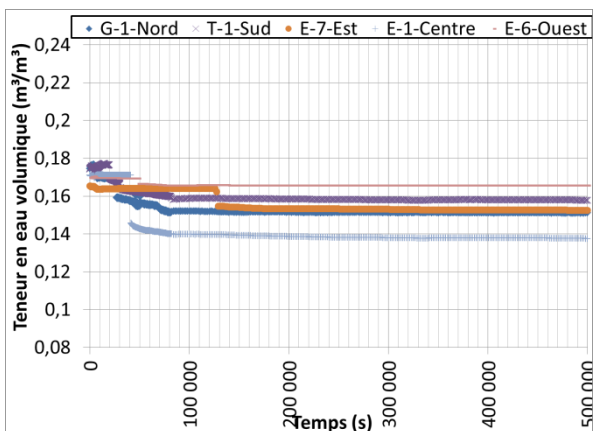
c) Milieu



d) Milieu



e) Bas



f) Bas

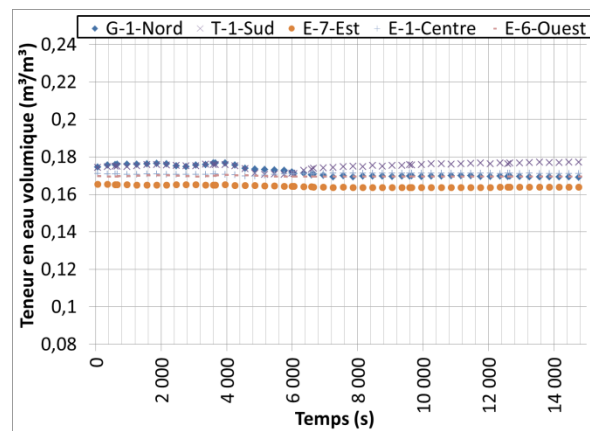


Figure 5.20 : Teneur en eau volumique mesurée en fonction du temps pendant l'essai M1E2 : pour la durée totale de l'essai, a) en surface, c) au milieu et e) au bas; pour les 4 premières heures de l'essai, b) en surface, d) au milieu et f) au bas.

DÉMONTAGE M1

Le démontage de la cuve M1 a été effectué selon le protocole décrit à section 4.2.10. Les sondes ont été localisées, récupérées et un échantillon a aussi été prélevé pour mesurer la teneur en eau massique (norme ASTM D2216-10) autour de chacune des sondes afin de comparer les valeurs. Pour chaque couche de roches stériles, trois (3) essais au cône de sable (ASTM D1556-07) ont été effectués pour évaluer la densité humide ρ_{hum} en place en mesurant le volume V et la masse M_{hum} et la teneur en eau massique ($w = M_w/M_s$). Le volume de roches stériles extrait pour chaque couche de matériau a été enregistré et une mesure de la teneur en eau massique (ASTM D2216-10) a été faite pour chaque chaudière extraite de la cuve. Les résultats moyens de cette caractérisation du matériau sont présentés au tableau 5-10; les résultats détaillés sont présentés à l'annexe A.

Le tableau 5.10 inclut une synthèse des mesures au démontage pour chaque couche de roches stériles incluent les mesures et le calcul des valeurs moyennes pour chacune des couches de matériau. On observe que la porosité et la densité du matériau est constante, alors que la teneur en eau augmente avec la profondeur. Le calcul de la teneur en eau volumique θ_v selon la teneur en eau massique w se fait à partir de l'équation 5-4 :

$$\theta_w = nS_r = w(1-n)D_r \quad (5-4)$$

Tableau 5.10 : Résultats de la caractérisation des roches stériles au démontage de M1 la cuve.

Couche	Teneur en eau massique moyenne $w_{\text{-moy}} \%$	Poids unitaire sec moyen $\gamma_{d\text{-moy}} \text{ kN/m}^3$	Porosité moyenne $n_{\text{-moy}}$	Indice des vides moyen $e_{\text{-moy}}$	Degré de saturation moyen $S_{r\text{-moy}}$	Teneur en eau volumique moyenne selon mesures w $\theta_{w\text{-moy}} \text{ m}^3/\text{m}^3$	Sondes : Teneur en eau volumique moyenne $\theta_{\text{-moy}} \text{ m}^3/\text{m}^3$
Précision (\pm)	0,1	0,1	0,02	0,02	0,02	0,04	0,03
3 ^e (surface)	6,4	17,5	0,35	0,54	0,33	0,11	0,13
2 ^e (milieu)	6,6	18,0	0,33	0,50	0,37	0,12	0,11
1 ^{re} (bas)	9,7	17,5	0,35	0,53	0,54	0,19	0,15

La distribution granulométrique des stériles au démontage est comparée à la figure 5.21 avec la courbe pour l'échantillon complet au démontage de M3 et celle qui obtenue à la réception du baril contenant l'échantillon.

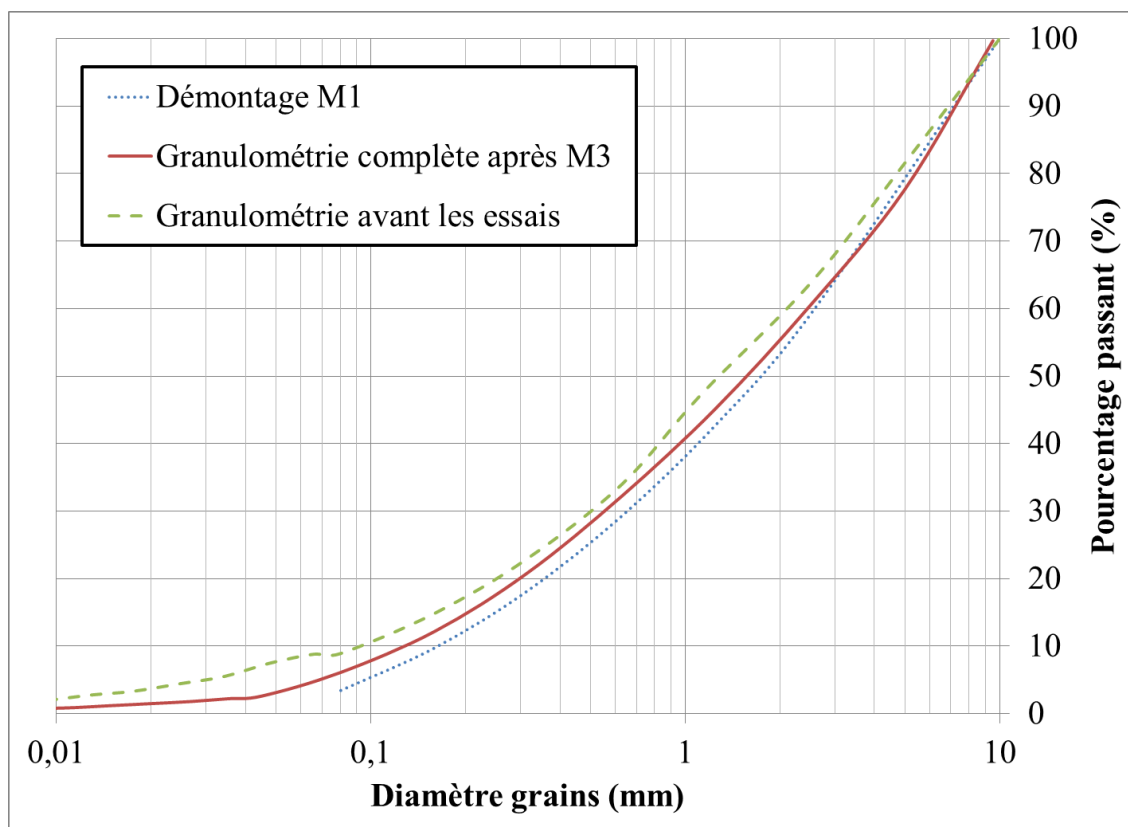


Figure 5.21 : Distributions granulométriques des roches stériles avant les essais et suite aux démontages M1 et M3.

MONTAGE M2

Le deuxième montage [M2] a été réalisé avec les roches stériles pour une énergie de compactage intermédiaire avec une hauteur de chute du disque de quinze (15) centimètres pour les trois couches. L'infiltromètre a été enfoncé dans le matériau à environ 7,5 cm ($\pm 0,2$ cm) de profondeur.

Les sondes diélectriques ont été placées dans chacune des couches de roches stériles selon le tableau 5.11; les cases ombragées (en gris) indiquent les sondes diélectriques qui ont été changées pour remplacer les sondes défectueuses du montage M1. L'emplacement représente la distance à partir de la paroi selon le schéma en croix établi à la figure 4.7.

Tableau 5.11 : Localisation des sondes diélectriques pour le montage M2.

Identification	Emplacement	Élévation à partir de la surface du géotextile-datum (cm)
Bas – 1^{re} couche		
G-1	30 cm Nord	5,7
T-1	30 cm Sud	5,8
E-7	15 cm Est	6,1
E-1	Centre	5,9
E-6	15 cm Ouest	5,5
Milieu – 2e couche		
G-2	30 cm Nord	15,6
T-2	30 cm Sud	15,7
E-8	Centre	15,7
E-16	15 cm Ouest	15,5
E-10	15 cm Est	15,8
Surface – 3e couche		
E-11	Centre	22,9
E-12	20 cm Sud	23,2
E-13	20 cm Nord	23,0
E-17	30 cm Ouest	22,6
E-15	30 cm Est	23,9

Plusieurs caractéristiques ont été mesurées pour chaque couche de roches stériles au moment du montage M2. Ces caractéristiques présentées dans le tableau 5.12 incluent la masse volumique moyenne (de $1\,707\text{ kg/m}^3 \pm 10\text{ kg/m}^3$) et la porosité (de $38\% \pm 2\%$). Le tableau 5.12 inclut les valeurs obtenues selon le protocole et les méthodes de calculs décrits à la section 4.1. Les valeurs de teneur en eau volumique θ_v , évaluées en fonction de la porosité n et de la teneur

en eau massique w sont présentées avec les valeurs obtenues des mesures avec les sondes diélectriques à droite du tableau 5.12. Les valeurs de teneur en eau volumique θ_v obtenues de ces deux façons sont de $0,08 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ($\pm 0,04 \text{ m}^3/\text{m}^3$) à travers les trois couches pour une teneur en eau (w) moyenne de $4,7\%$ ($\pm 0,1\%$).

Tableau 5.12 : Caractéristiques des roches stériles au montage M2.

Couche de roches stériles	Masse volumique sèche, ρ_d (kg/m ³)	Teneur en eau, w (%)	Porosité, n (-)	Degré de saturation, S_r (%)	Teneur en eau volumique selon mesures w , θ_w (m ³ /m ³)	Teneur en eau volumique sondes diélectriques θ (m ³ /m ³)
Précision	10	0,1	0,02	0,02	0,04	0,03
1 ^{re} (Bas)	1 699,6	4,9	0,38	0,22	0,08	0,09
2 ^e (Milieu)	1 698,8	4,7	0,38	0,21	0,08	0,08
3 ^e (Surface)	1 722,6	4,4	0,37	0,20	0,08	0,08

Les paramètres de base pour chacun des essais d'infiltration (E1, E3 et E4) et l'essai de drainage (E2) sont présentés dans le tableau 5.13. La masse sèche totale du matériau était de $346,18 \text{ kg}$ ($\pm 0,03 \text{ kg}$; précision balance de $\pm 0,002 \text{ kg}$; 16 mesures) dans la cuve pour un volume de $202\,791 \text{ cm}^3$ sur une épaisseur de $31,2 \text{ cm}$ ($\pm 1 \text{ cm}$ selon écart type moyen sur 25 valeurs) après compactage. L'effort de compactage total appliqué sur le matériau est de $2\,888 \text{ kN-m/m}^3$ ($3\,205 \text{ kJ/m}^3$). La charge hydraulique moyenne H_{moy} pendant l'essai est déterminée par les capteurs de pression dont la précision est de $\pm 1 \text{ cm H}_2\text{O}$; l'écart type est calculé à partir des valeurs enregistrées par ces sondes pendant l'essai. Le gradient moyen est défini comme étant la charge moyenne appliquée, H_{moy} , divisée par l'épaisseur du matériau, $31,2 \text{ cm}$.

Tableau 5.13 : Caractéristiques des essais réalisés dans la cuve pour le montage M2

Identification des essais	Type d'essai d'infiltration, Aire d'infiltration (cm ²)	Charge avec écart type et gradient moyen
M2E1	Charge constante, Infiltromètre (716)	$H_{moy} = 2,7 \pm 0,8$ cm, $i_{moy}=0,09$
M2E2	Charge variable, Cuve (6504)	$H_{max} = 13,4 \pm 2,0$ cm, $i_{max} = 0,43$
M2E3	Charge constante, Infiltromètre (716)	$H_{moy}=3,5 \pm 1,2$ cm, $i_{moy}=0,1$
M2E4 (duplicata M2E3)		$H_{moy} = 4,2 \pm 0,7$ cm, $i_{moy} = 0,17$

SOMMAIRE DES RÉSULTATS M2

Un sommaire des résultats des essais d'infiltration et de drainage est présenté au tableau 5.14. Les détails des conditions d'essai et des résultats de l'essai de drainage (M2E2) sont présentés dans ce qui suit. Les graphiques et détails relatifs à chacun des essais d'infiltration sont présentés à l'annexe A.

Le volume d'eau sortant de la cuve pour l'essai E1 est faible en comparaison avec le volume d'eau entrant. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que l'essai E1 est le premier essai effectué après le montage et que les pores du matériau se remplissent et l'eau est ensuite retenue par la succion matricielle. Cette observation est aussi valide pour l'essai M3E1.

Tableau 5.14 : Sommaire des principaux résultats des essais d'infiltration et de drainage pour le montage M2

	E1 (infiltromètre)	E2 (drainage)	E3 (infiltromètre)	E4 (duplicata E3)
Délai avant début de l'exfiltration au bas de la cuve	00 :29 :35	S.O.	00 :16 :25	00 :05 :40
Durée infiltration	05 :43 :00	01 :23 :00 à 01 :33 :00	04 :06 :00	04 :00 :00
Durée exfiltration	06 :36 :00	04 :45 :00	04 :15 :00	03 :25 :00
Vitesse infiltration moyenne (cm/s)	0,010	0,002	0,007	0,006
Vitesse exfiltration maximale (cm/s)	0,009	0,002	0,006	0,005
Débit max. infiltration, Q_{Tinf} (cm ³ /s)	9,2	15,7	5,0	4,2
Débit max. exfiltration, Q_{Texf} (cm ³ /s)	6,8	15,2	4,5	3,7
Volume total infiltré, V_{Tinf} (cm ³)	128 262	S.O.	65 252	37 187
Volume total exfiltré, V_{Texf} (cm ³)	116 156	101 253	65 140	38 529

Les résultats des mesures des vitesses d'infiltration (axe de gauche) et d'exfiltration (axe de droite) sont présentés à la figure 5.22. Les équations d'infiltration présentées sur la figure sont linéaires au début des essais pour chacune des sondes placées en surface. La vitesse d'infiltration au cours de l'essai en cm/s est en moyenne de 0,0024 cm/s pour l'infiltration et l'exfiltration du temps 0 s à 4 500 s et la charge initiale (en cm) de l'essai est en moyenne 12,4 cm H₂O (± 1 cm H₂O) selon les valeurs enregistrées par les cinq (5) capteurs de pression au début de l'essai.

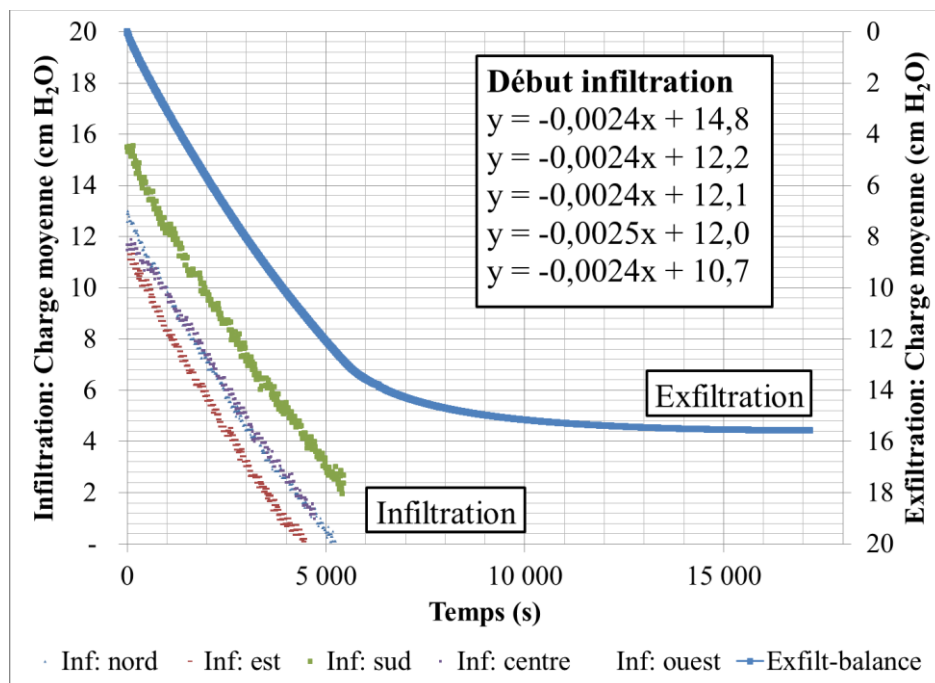
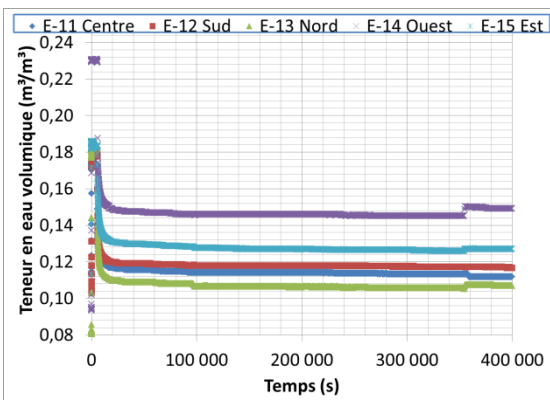


Figure 5.22 : Charge mesurée pendant l'essai de drainage M2E2 en surface (infiltration) et à la sortie (exfiltration) : les valeurs converties selon le diamètre du récipient. Infiltration : axe vertical gauche, exfiltration : axe vertical droit.

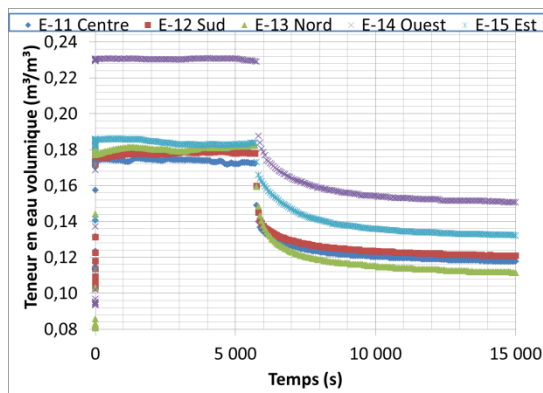
Les valeurs de teneur en eau volumique, θ_v , pour chaque couche sont présentées en fonction du temps à la figure 5.23 a, c et e. La figure 5.23 b, d et f présente les valeurs de teneur en eau volumique θ_w calculée au début de l'essai (les premières 4 heures). La sonde E-8 était défectueuse donc ces valeurs ne sont pas valides. Quelques observations préliminaires ont été notées en relation avec les figures de teneur en eau volumique en fonction du temps :

- La teneur en eau θ_v à la fin de l'essai se situe entre 0,08 et 0,15 ($\pm 0,03$);
- La teneur en eau θ_v maximale lorsque le matériau est à un degré de saturation S_r élevé se situe entre 0,17 et 0,24 ($\pm 0,03$), ce qui est plus faible que la porosité du matériau. Ceci implique que le matériau n'était pas complètement saturé (S_r environ à 30% selon données au démontage);
- La baisse du degré de saturation S_r et de la teneur en eau volumique θ_v débute à environ 6 000 secondes en surface et à 17 000 secondes en profondeur.

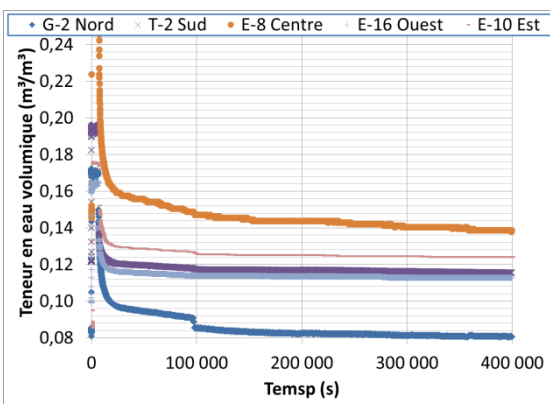
a) Surface



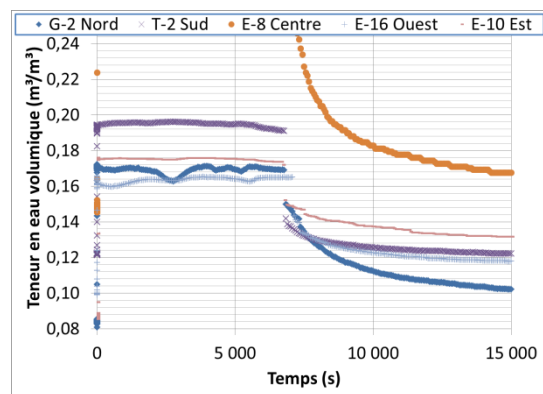
b) Surface



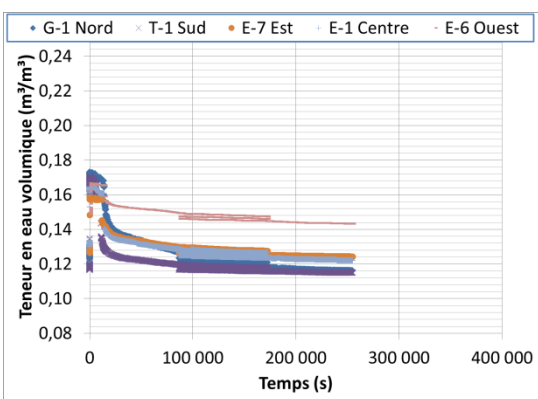
c) Milieu



d) Milieu



e) Bas



f) Bas

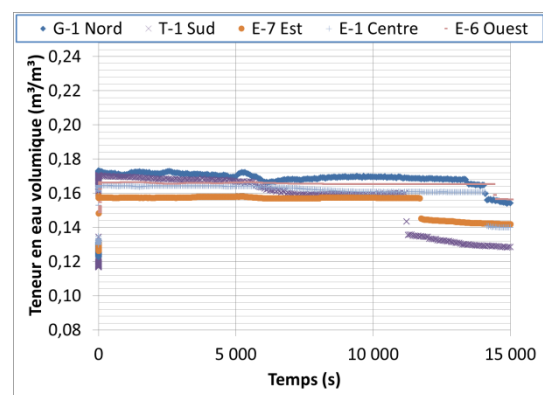


Figure 5.23 : Teneur en eau volumique en fonction du temps pendant l'essai M2E2: pendant la durée totale de l'essai pour a) en surface, c) au milieu et e) au bas, ainsi que pour les 4 premières heures de l'essai pour b) en surface, d) au milieu et f) au bas.

DÉMONTAGE M2

Le démontage de la cuve M2 a été effectué selon le protocole décrit à la section 4.2.10. Les résultats moyens de cette caractérisation du matériau sont présentés au tableau 5.15; les résultats détaillés sont présentés à l'annexe A. La distribution granulométrique après l'essai est comparée avec la courbe pour l'échantillon complet qui a été fait après tous les essais en cuve à la figure 5.24. On peut noter que le matériau semble avoir une granulométrie plus fine au montage qu'au démontage. Il est toutefois possible que la différence de granulométrie soit due à l'échantillonnage. Le tableau 5.15 inclut une synthèse des mesures (et calculs) au démontage pour chaque couche de roches stériles.

Tableau 5.15 : Résultats de la caractérisation des roches stériles au démontage de la cuve M2.

	Teneur en eau massique moyenne $w\%_{-moy}$ %	Poids unitaire sec moyen γ_{d-moy} kN/m ³	Porosité moyenne n_{-moy}	Indice des vides moyen e_{-moy}	Saturatio n moyenne S_{r-moy}	Teneur en eau volumique moyenne θ_{w-moy} m ³ /m ³	Sondes : Teneur en eau volumique moyenne θ_{-moy} m ³ /m ³
Précision	0,1	0,1	0,02	0,02	0,02	0,04	0,03
3 ^e (surface)	5,0	18,8	0,30	0,42	0,33	0,10	0,11
2 ^e (milieu)	5,2	18,3	0,32	0,47	0,31	0,10	0,10
1 ^{re} (bas)	5,9	17,3	0,35	0,55	0,29	0,10	0,10

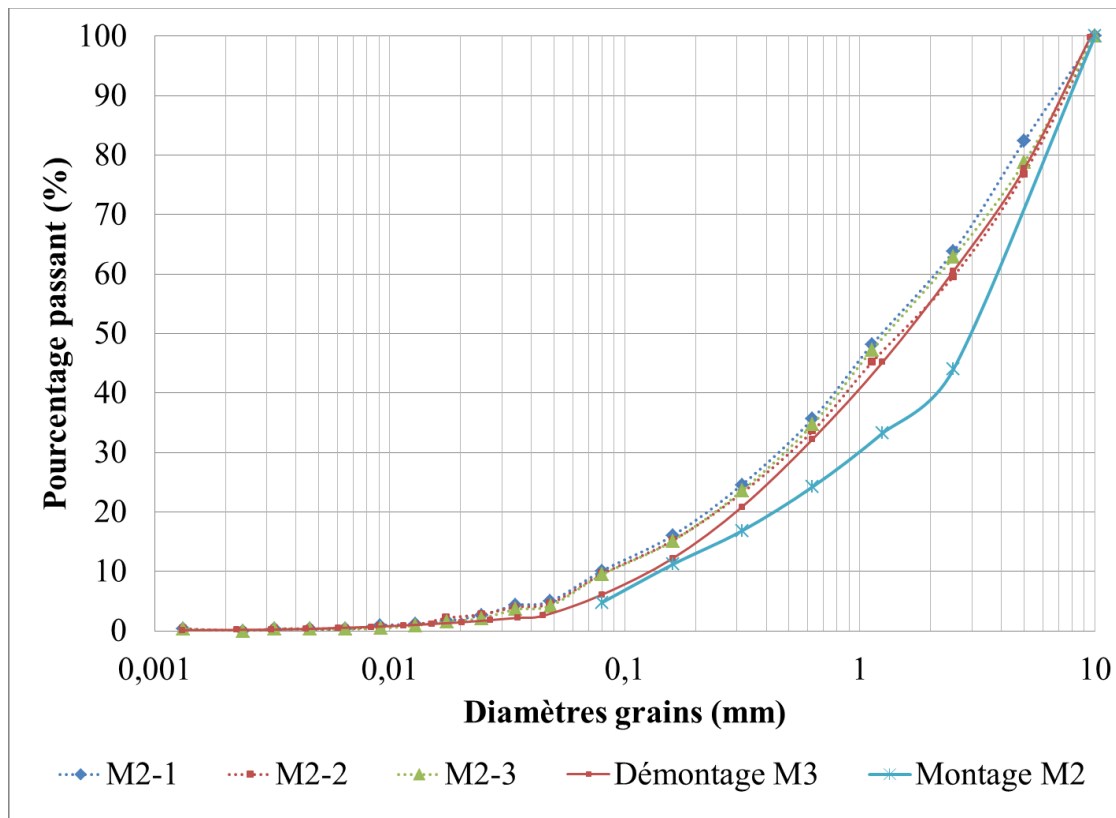


Figure 5.24 : Distributions granulométriques des roches stériles suite aux essais du démontage M2.

MONTAGE M3

Le montage M3 a été construit avec les roches stériles pour une énergie de compactage élevé avec une hauteur de chute du disque de trente (30) centimètres pour les trois couches. L'infiltromètre a été enfoncé dans le matériau à environ 6,0 cm de profondeur.

Les sondes diélectriques ont été placées dans le matériau pour chacune des couches selon le tableau 5.16. La case ombragée en gris indique que la sonde E-17 a remplacé une sonde qui était défectueuse au montage M2.

Tableau 5.16 : Localisation des sondes diélectriques pour le montage M3.

Identification	Emplacement	Élévation à partir de la surface du géotextile-datum (cm)
Bas - 1^{re} couche		
G-1	30 cm Nord	5,7
T-1	30 cm Sud	5,8
E-7	15 cm Est	6,1
E-1	Centre	5,9
E-6	15 cm Ouest	5,5
Milieu - 2^e couche		
G-2	30 cm Nord	15,6
T-2	30 cm Sud	15,7
E-8	Centre	15,7
E-16	15 cm Ouest	15,5
E-10	15 cm Est	15,8
Surface - 3^e couche		
E-11	Centre	22,9
E-12	20 cm Sud	23,2
E-13	20 cm Nord	23,0
E-17	15 cm Ouest	22,6
E-15	15 cm Est	23,9

Pour le montage M3, plusieurs caractéristiques ont été enregistrées pour chaque couche de roches stériles au moment du montage de la cuve. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau 5.17, qui fait état d'une masse volumique moyenne de $1\,739\text{ kg/m}^3$ ($\pm 10\text{ kg/m}^3$) et une porosité n de 36% ($\pm 2\%$). Les valeurs de teneur en eau volumique obtenues ont une valeur de $0,07\text{ m}^3/\text{m}^3$ ($\pm 0,04\text{ m}^3/\text{m}^3$) à travers les trois couches pour une teneur en eau (w) moyenne de 3,7% ($\pm 0,1\%$).

Tableau 5.17 : Caractéristiques des roches stériles au montage M3.

Couche de roches stériles	Masse volumique sèche, ρ_d (kg/m ³)	Teneur en eau, w (%)	Porosité, n (-)	Degré de saturation, S_r (%)	Teneur en eau volumique mesurée θ_w (m ³ /m ³)	Teneur en eau volumique sondes diélectriques θ (m ³ /m ³)
Précision	10	0,1	0,02	0,02	0,04	0,03
1 ^{re} (Bas)	1 688,1	3,9	0,38	0,17	0,07	0,08
2 ^e (Milieu)	1819,2	3,6	0,33	0,20	0,07	0,08
3 ^e (Surface)	1731,6	3,6	0,37	0,17	0,06	0,05

Les paramètres de base pour chacun des essais d'infiltration (E1, E3 et E4) et l'essai de drainage (E2) sont présentés ici-bas dans le tableau 5.18. La masse sèche totale du matériau était de 336,03 kg ($\pm 0,03$ kg; précision balance $\pm 0,002$ kg; 16 mesures) dans la cuve pour un volume de 193 230 cm³ sur une épaisseur de 29,5 cm (± 1 cm selon écart type moyen) après compactage. L'énergie de compactage totale appliquée sur le matériau est de 5 828 kN-m/m³ (6 410 kJ/m³). La charge hydraulique moyenne H_{moy} pendant l'essai est déterminée par les capteurs de pression dont la précision est de ± 1 cm H₂O. Le gradient moyen est défini comme étant la charge moyenne appliquée, H_{moy} , divisée par l'épaisseur du matériau, 29,5 cm.

Tableau 5.18 : Caractéristiques des essais dans le montage M3

Identification des essais	Type d'essai d'infiltration, aire d'infiltration (cm ²)	Charge avec écart type et gradient moyen
M3E1	Charge constante, Infiltromètre (716 cm ²)	$H_{moy}=3,5 \pm 0,5$ cm, $i_{moy}=0,14$
M3E2	Charge variable, Cuve (6504 cm ²)	$H_{max}=16,4 \pm 0,8$ cm, $i_{max}=0,55$
M3E3	Charge constante, Infiltromètre (716 cm ²)	$H_{moy}=2,8 \pm 0,7$ cm, $i_{moy}=0,12$
M3E4 (duplicata M3E3)		$H_{moy}=3,3 \pm 0,6$ cm, $i_{moy}=0,15$

SOMMAIRE DES RÉSULTATS M3

Un sommaire des résultats des essais d'infiltration et de drainage est présenté au tableau 5.19 suivant. Les graphiques et détails relatifs aux essais d'infiltration sont disponibles à l'annexe A. Les détails des conditions d'essai et des résultats de l'essai de drainage (M3E2) sont présentés dans ce qui suit.

Tableau 5.19 : Sommaire des principaux résultats des essais d'infiltration et de drainage pour le montage M3

	E1 (infiltromètre)	E2 (drainage)	E3 (infiltromètre)	E4 (duplicata E3)
Délai avant début exfiltration au bas de la cuve	00 :57 :20	S.O.	00 :59 :00	00 :34 :37
Durée infiltration	07 :16 :00	01:30 :00	03 :27 :00	04 :00 :00
Durée exfiltration	09 :32 :00	02 :22 :00	06 :20 :00	04 :50 :00
Vitesse infiltration moyenne (cm/s)	0,008	0,003	0,007	0,003
Vitesse exfiltration maximale (cm/s)	0,006	0,003	0,006	0,003
Débit max. infiltration, Q_{Tinf} (cm ³ /s)	5,9	17,8	4,7	2,5
Débit max. exfiltration, Q_{Texf} (cm ³ /s)	4,6	18,0	4,4	2,3
Volume total infiltré, V_{Tinf} (cm ³)	117 948	S.O.	83 001	31 995
Volume total exfiltré, V_{Texf} (cm ³)	117 948	118 523	61 406	37 643

L'essai de drainage M3E2 a été effectué en remplissant la cuve par le bas (l'exutoire) à faible débit jusqu'à ce que la charge d'eau en surface soit entre 15 cm et 17 cm au-dessus des roches stériles.

Les résultats des mesures des vitesses d'infiltration (axe de gauche) et d'exfiltration (axe de droite) sont présentés à la figure 5.25. Les équations présentées sur la figure sont linéaires au

début de chaque essai pour chacune des sondes mesurant l'infiltration, la vitesse moyenne étant de 0,0027 cm/s pour l'infiltration et l'exfiltration du temps 0 s à 5 000 s et la charge initiale (en cm) de l'essai qui est à 15,2 cm H₂O (± 1 cm H₂O).

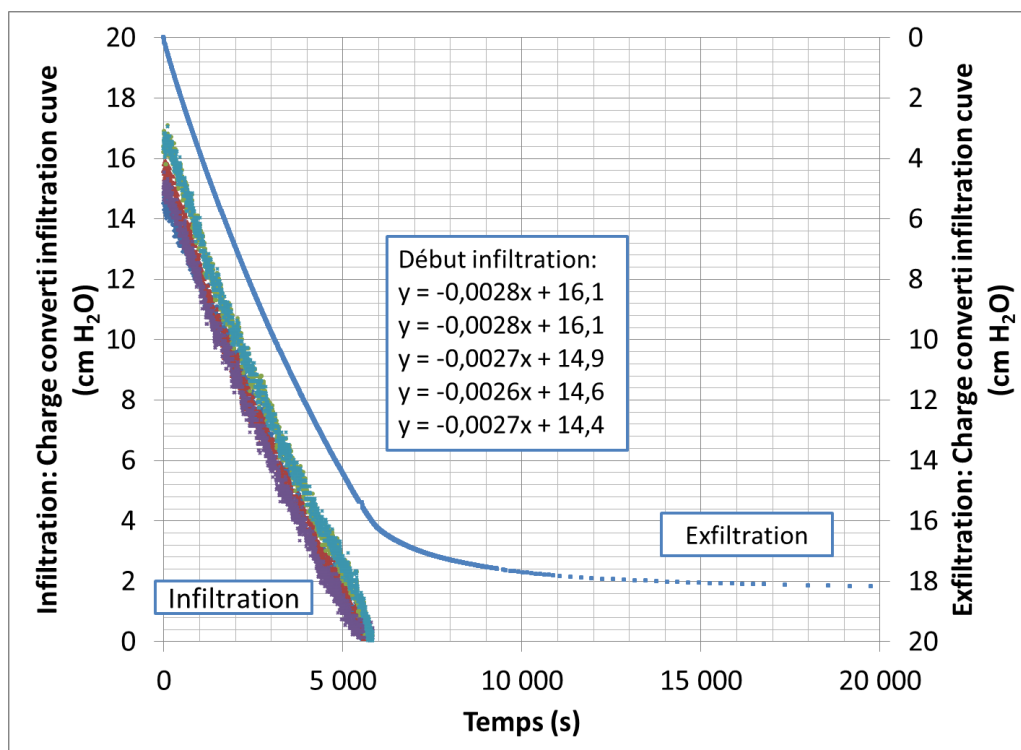


Figure 5.25 : Charge moyenne pendant l'essai de drainage M3E2 en surface (infiltration) et à la sortie (exfiltration) : les valeurs converties selon le diamètre du récipient. Infiltration : axe vertical gauche, exfiltration : axe vertical droit.

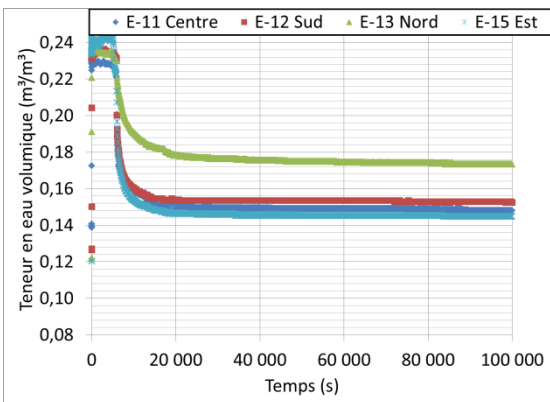
Les valeurs de teneur en eau volumique calculées pour chaque couche de matériau sont présentées en fonction du temps écoulé en secondes à la figure 5.26 a, c et e. La figure 5.26 b, d et f présente les valeurs de teneur en eau volumique calculées au début de l'essai (les premières 4 heures).

Quelques observations préliminaires peuvent être faites :

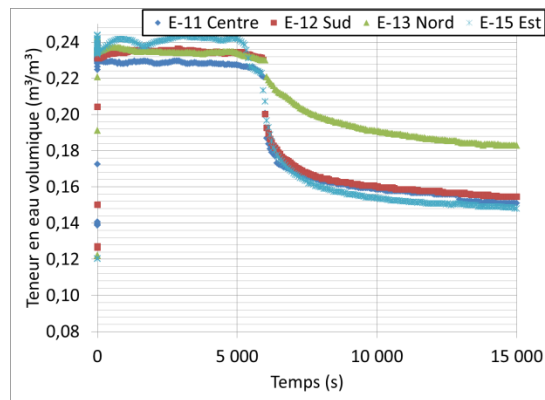
- La teneur en eau volumique θ_v à la fin de l'essai se situe entre 0,14 et 0,15 ($\pm 0,03$), ce qui est plus élevée que pour les montages M1 et M2;

- La teneur en eau volumique θ_v maximale lorsque le degré de saturation S_r est élevé se situe entre 0,17 et 0,24 ($\pm 0,03$), ce qui est plus faible que la porosité du matériau. Ceci implique que le matériau n'était pas complètement saturé;
- La baisse du degré de saturation débute à environ 6 000 secondes en surface et à 19 000 secondes en profondeur, suite au drainage vers le bas.

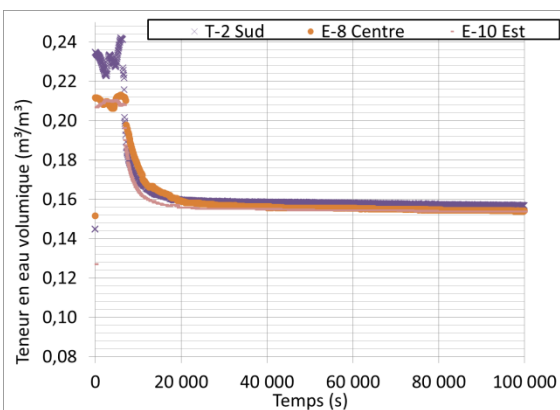
a) Surface



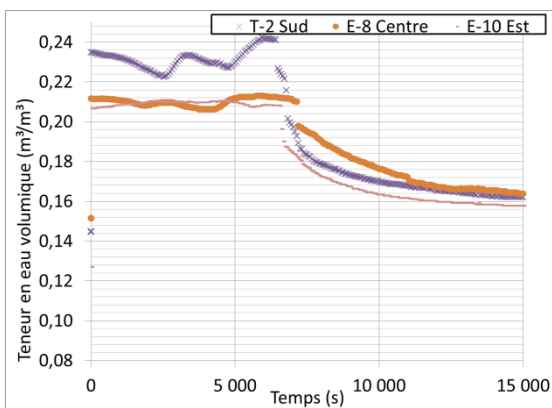
b) Surface



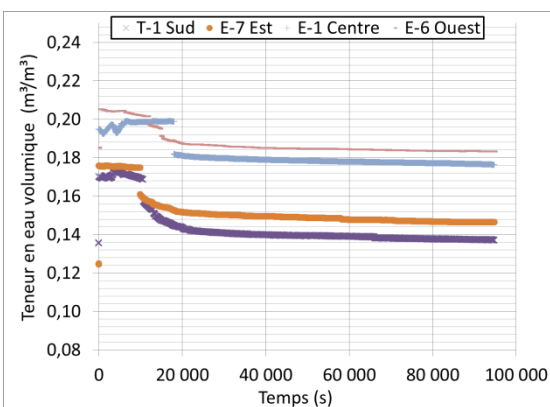
c) Milieu



d) Milieu



e) Bas



f) Bas

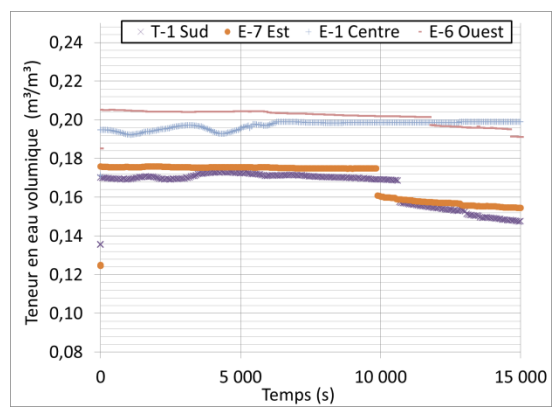


Figure 5.26 : Teneur en eau volumique en fonction du temps pendant l'essai M3E2 : pendant la durée totale de l'essai pour a) en surface, c) au milieu et e) au bas, ainsi que pour les 4 premières heures de l'essai pour b) en surface, d) au milieu et f) au bas.

5.2.2 Résultats des essais d'infiltration M3E3 et M3E4

Les résultats détaillés des essais d'infiltration sont présentés à l'annexe A. Les résultats des essais M3E3 et M3E4 sont présentés ici plus en détail à titre d'exemple. Ces résultats pour les essais dans le montage M3 (M3E3 et M3E4) ont été sélectionnés, car les conditions de laboratoire ont été jugées optimales dû à l'énergie de compactage appliquée plus élevée et l'expérience acquise. Les résultats de ces essais peuvent aussi être combinés aux résultats du démontage de la cuve M3. L'essai E3 suit l'essai E2 où toute la cuve a été saturée avant le drainage d'eau jusqu'à l'atteinte de l'équilibre (stabilisation) des teneurs en eau volumique enregistrés par les sondes diélectriques. L'essai E4 suit l'essai E3 qui est un essai d'infiltration avec infiltromètre au centre de la cuve lorsque l'essai d'infiltration est terminé; l'essai E4 ne débute pas avant l'atteinte de l'équilibre des teneurs en eau volumique enregistrés par les sondes diélectriques pour l'essai E3. Les conditions initiales des deux essais sont donc différentes. Aussi, un couvercle a été mis sur le dessus de la cuve pour le drainage de l'essai E3 et aucun couvercle n'a été mis sur la cuve pour l'essai E4 jusqu'à l'atteinte de l'équilibre.

La charge appliquée en surface du matériau dans l'infiltromètre pendant l'essai est présentée sur les figures 5.28 et 5.29 pour les essais M3E3 et M3E4, respectivement. La charge a été mesurée en continue à l'aide de deux (2) sondes à pression placées dans le fond de l'infiltromètre en surface du matériau. La charge hydraulique moyenne H_{moy} pendant l'essai est déterminée par les capteurs de pression dont la précision est de ± 1 cm H₂O. La charge moyenne pour l'essai M3E3 est de 2,8 cm H₂O et de 3,3 cm H₂O pour l'essai M3E4.

Les essais E3 et E4 débutent lorsque la charge d'eau est appliquée dans l'infiltromètre. Il y a un délai avant d'observer la sortie de l'eau infiltrée au bas de la cuve. Lorsque l'application d'une charge d'eau dans l'infiltromètre est arrêtée, la teneur en eau volumique θ_v diminue graduellement de la surface vers le bas de la cuve.

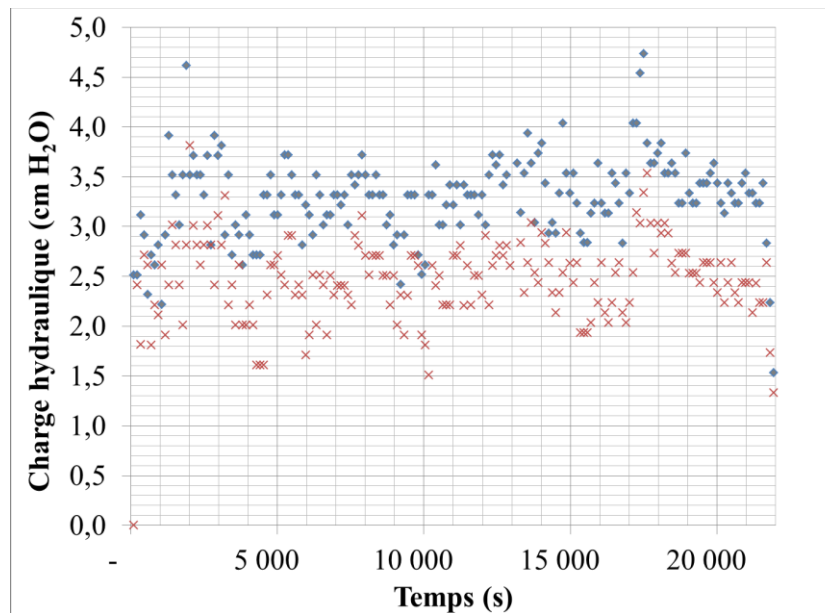


Figure 5.27 : Charge hydraulique appliquée à la surface dans l'infiltromètre pour l'essai M3E3 en fonction du temps. Résultats obtenus par deux capteurs de pression distincts (B9016 et B9107).

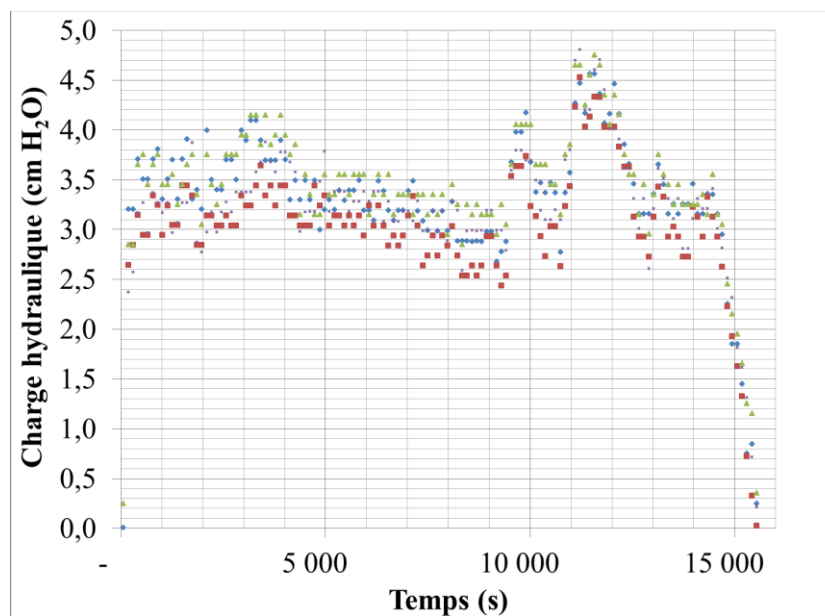


Figure 5.28 : Charge hydraulique appliquée à la surface dans l'infiltromètre pour l'essai M3E4 en fonction du temps. Résultats obtenus par quatre capteurs de pression distincts (B9114, G3178, B9021 et B9107).

Les vitesses d'infiltration et d'exfiltration de l'eau à travers le matériau sont représentées par la pente des équations (linéaires) pour le début des essais M3E3 et M3E4 aux figures 5.29 et 5.30, respectivement. Les valeurs des charges d'eau (cm H₂O) à l'infiltration et à l'exfiltration ont été converties à la charge équivalente dans l'infiltromètre en fonction du diamètre intérieur de l'infiltromètre pour qu'elles soient comparables entre elles. Cette standardisation des valeurs de la charge permet de comparer les essais entre eux. Sur les figures 5.29 et 5.30 les valeurs mesurées à l'infiltration sont représentées sur l'axe vertical de gauche et les valeurs à l'exfiltration sur l'axe vertical de droite. L'axe vertical de droite présente les données dans l'ordre inverse afin qu'on puisse bien voir la relation entre la charge d'eau d'infiltration et l'exfiltration, qui sont parallèles jusqu'à ce que la désaturation débute. Les données d'infiltration sont seulement enregistrées lorsqu'il y a une charge d'eau dans l'infiltromètre.

La vitesse moyenne d'infiltration de l'eau lors de l'essai M3E3 est presque deux fois plus rapide que pour M3E4. Ceci peut être expliqué par la valeur de la teneur en eau plus élevée du matériau pour l'essai M3E3 suite à l'essai M3E2. Le drainage (l'exfiltration) débute après quelques minutes, donc la charge d'eau au point de drainage est de 0 cm H₂O. Le débit moyen a été calculé à partir de la vitesse d'infiltration et/ou d'exfiltration, et multiplié par l'aire de la surface d'infiltration. Le débit d'infiltration moyen lors de l'essai M3E3 est de 4,7 cm³/s et à l'exfiltration est de 4,4 cm³/s. Le débit moyen lors de l'essai M3E4 à l'infiltration est de 2,4 cm³/s et à l'exfiltration est de 2,3 cm³/s.

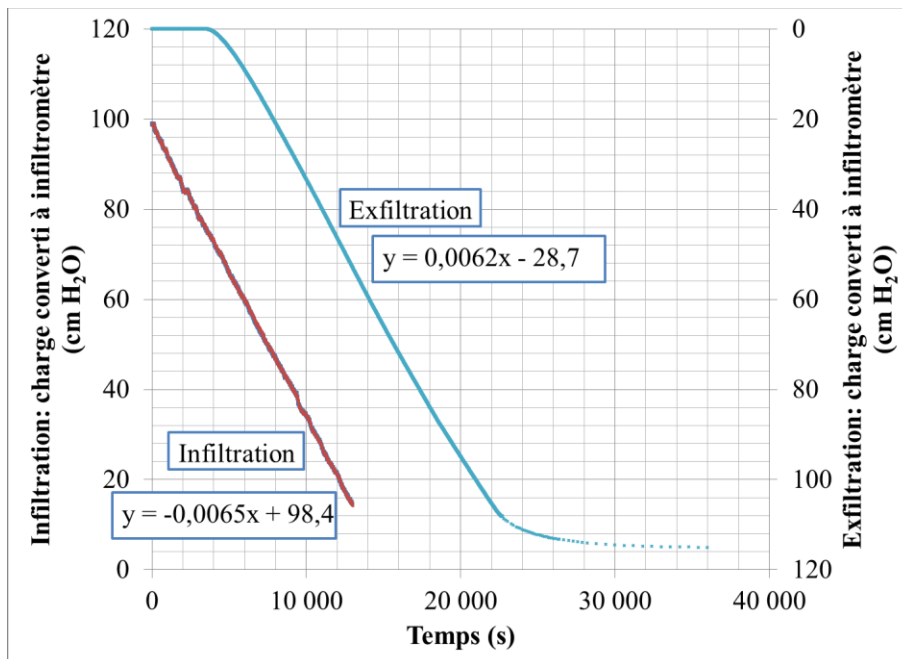


Figure 5.29 : Charge d'infiltration et d'exfiltration cumulative de l'eau en fonction du temps pour l'essai M3E3.

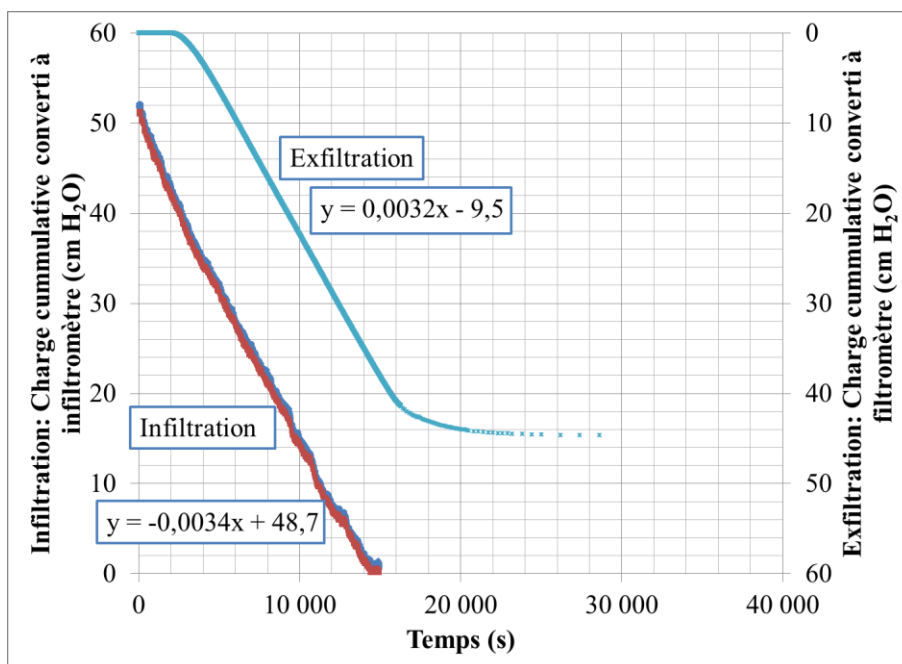
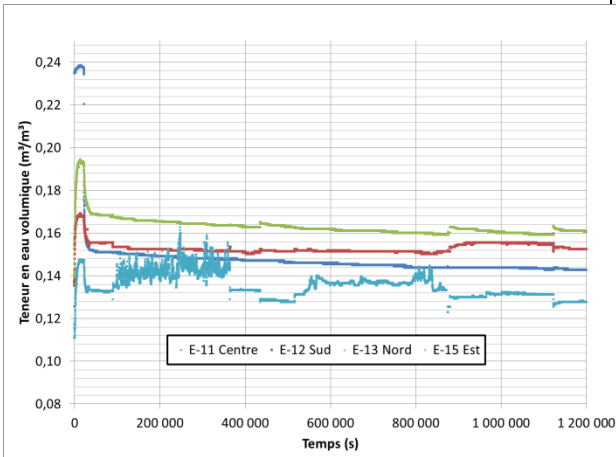


Figure 5.30 : Charge d'infiltration et d'exfiltration cumulative de l'eau en fonction du temps pour l'essai M3E4.

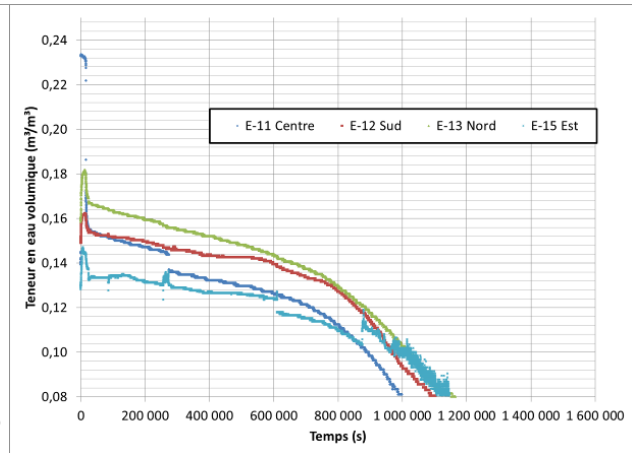
Deux graphiques représentent la teneur en eau volumique θ_v selon les sondes pour chacune des trois couches de roches stériles est présenté à la figure 5.31. Un graphique présente la durée totale de l'essai, et l'autre montre les premières 50 000 secondes (près de 14h) afin de mieux visualiser le début de l'essai d'infiltration. Puisque la cuve de l'essai E4 n'a pas été recouverte, il est possible d'observer aux graphiques b, f et j de la figure 5.31 que la teneur en eau du matériau à la fin de l'essai est très faible dû à l'évaporation.

Toutes les sondes (à l'exception de celle situé en surface au centre de l'infiltromètre) montrent qu'il y a un délai de réponse avant que la teneur en eau volumique augmente. Il y a une progression de l'augmentation de la teneur en eau volumique vers le bas de la cuve.

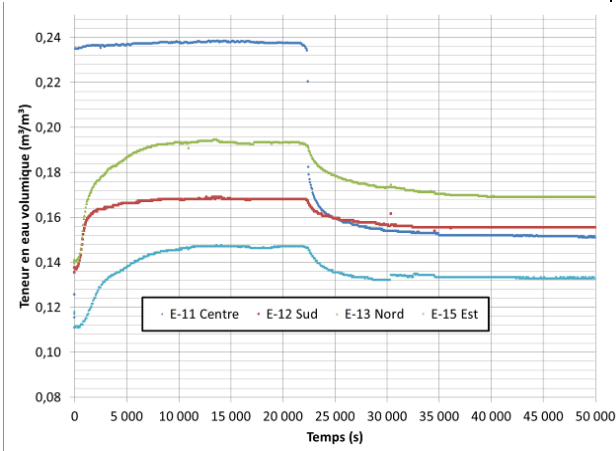
De façon générale, les valeurs de teneur en eau volumique θ_v à la fin des essais pour M3E4 sont plus basses que pour M3E3. Ceci indique que l'évaporation pourrait avoir joué un rôle sur l'évolution de la teneur en eau volumique du matériau en surface (voir la figure 5.31 a et b).



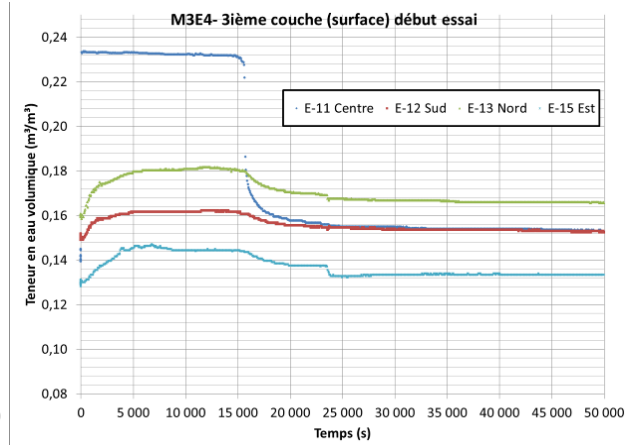
a) M3E3- matériau en surface pendant la durée totale de l'essai



b) M3E4- matériau en surface pendant la durée totale de l'essai

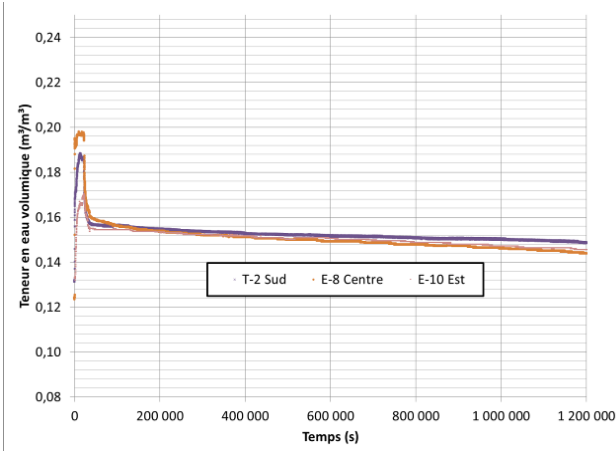


c) M3E3- matériau en surface au début de l'essai

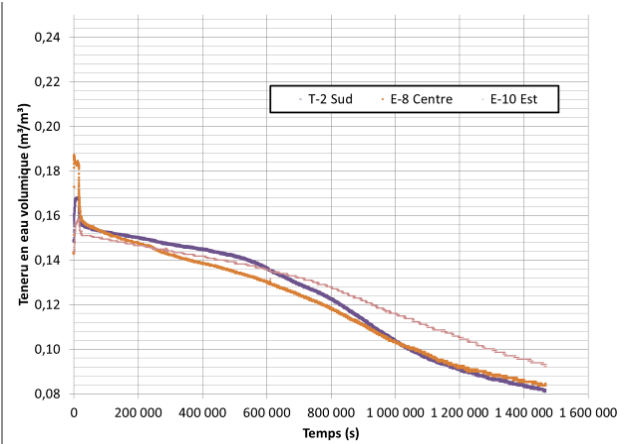


d) M3E4- matériau en surface au début de l'essai

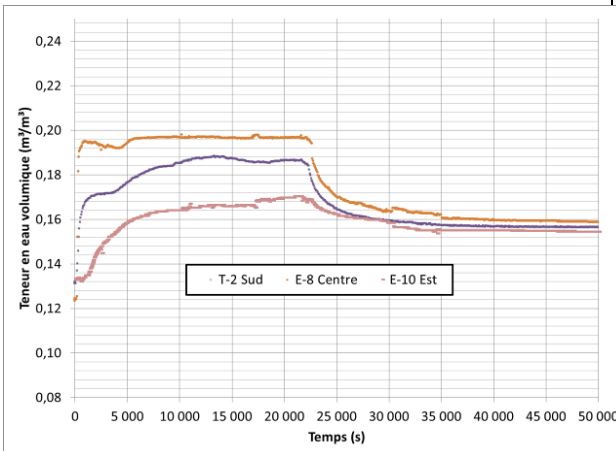
Figure 5.31 : Teneur en eau volumique mesurée en fonction du temps pendant les essais M3E3 (colonne de gauche) et M3E4 (colonne de droite).



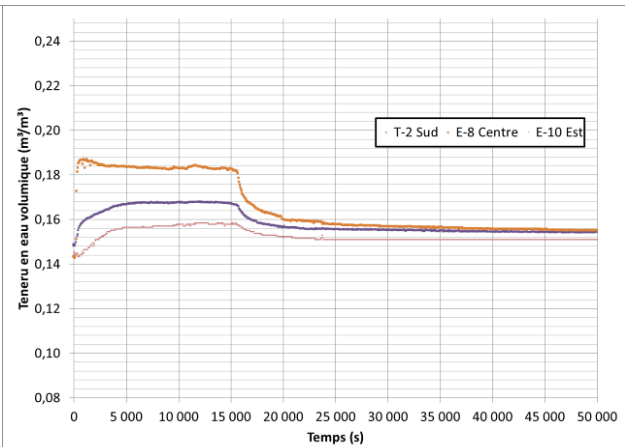
e) M3E3- matériau au milieu pendant la durée totale de l'essai



f) M3E4- matériau au milieu pendant la durée totale de l'essai

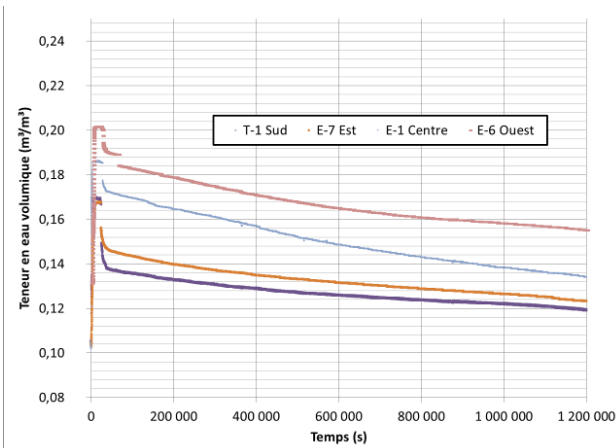


g) M3E3- matériau au milieu au début de l'essai

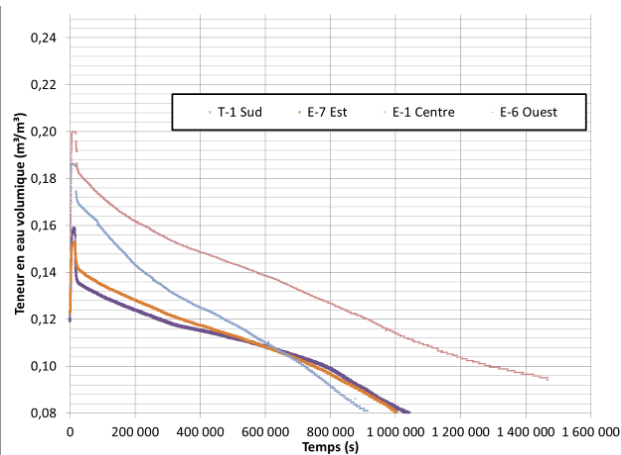


h) M3E4- matériau au milieu au début de l'essai

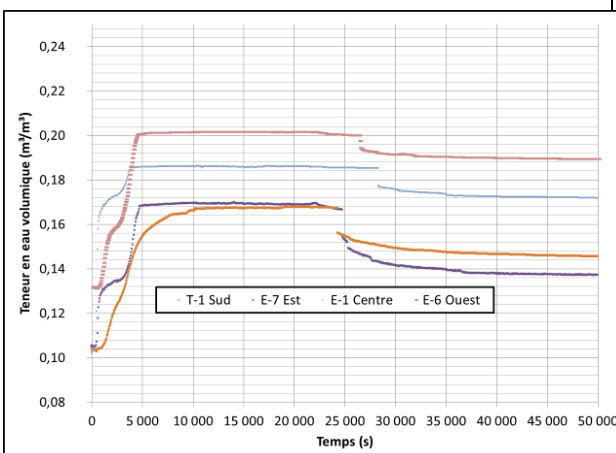
Figure 5.31 (suite) : Teneur en eau volumique mesurée en fonction du temps pendant les essais M3E3 (colonne de gauche) et M3E4 (colonne de droite).



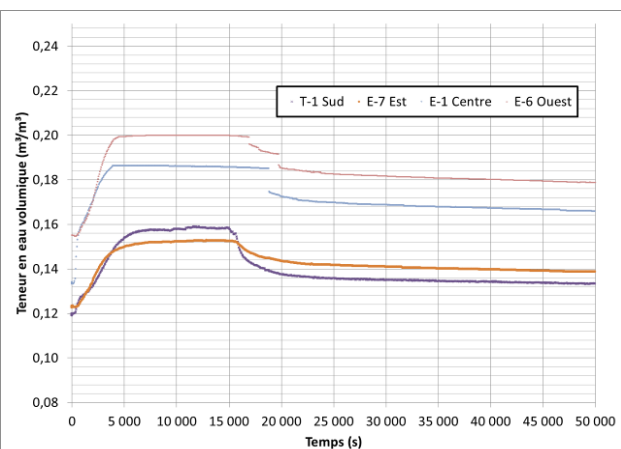
i) M3E3- matériau au bas pendant la durée totale de l'essai



j) M3E4- matériau au bas pendant la durée totale de l'essai



k) M3E3- matériau au bas au début de l'essai



l) M3E4- matériau au bas au début de l'essai

Figure 5.31 (suite et fin) : Teneur en eau volumique mesurée en fonction du temps pendant les essais M3E3 (colonne de gauche) et M3E4 (colonne de droite).

DÉMONTAGE M3

Le démontage de la cuve M3 a été effectué selon le protocole décrit à la section 4.2.10. Les résultats détaillés sont présentés à l'annexe A. La distribution granulométrique après l'essai est comparée avec la courbe pour l'échantillon complet qui a été fait après tous les essais en cuve à la figure 5.32. Une comparaison de la distribution granulométrique entre les conditions au démontage de cuves est présentée à la figure 6.3. Le tableau 5.20 inclut une synthèse des mesures et calculs faits au démontage pour chaque couche de roches stériles.

Les résultats des essais en cuve ont été interprétés et analysés au chapitre 6.

Tableau 5.20 : Sommaire des résultats de la caractérisation des roches stériles au démontage de la cuve M3.

	Teneur en eau massique moyenne $w^{\%}_{\text{-moy}}$ %	Poids unitaire sec moyen $\gamma_{d\text{-moy}}$ kN/m ³	Porosité moyenne $n_{\text{-moy}}$	Indice des vides moyen $e_{\text{-moy}}$	Degré de saturation moyenne $S_{r\text{-moy}}$	Teneur en eau volumique moyenne selon w $\theta_{w\text{-moy}}$ m ³ /m ³	Sondes : Teneur en eau volumique moyenne $\theta_{\text{-moy}}$ m ³ /m ³
Précision	0,1	0,1	0,02	0,02	0,02	0,04	0,03
3 ^e (surface)	1,0	19,1	0,29	0,44	8,2%	0,02	0,06
2 ^e (milieu)	2,0	20,8	0,23	0,32	30,5%	0,04	0,07
1 ^{re} (bas)	2,1	20,5	0,23	0,33	25,6%	0,04	0,07

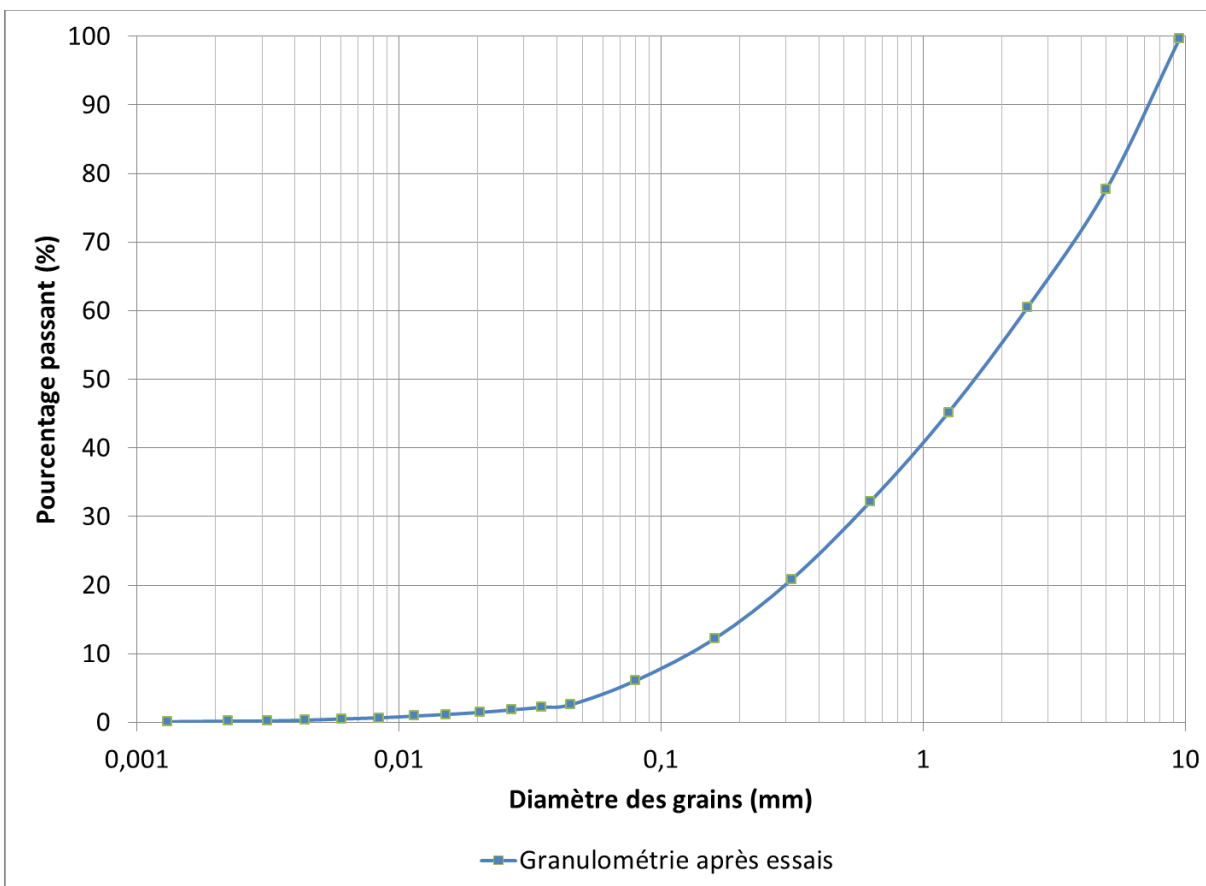


Figure 5.32 : Distribution granulométrique des roches stériles suite aux essais du démontage M3.

CHAPITRE 6 INTERPRÉTATION, ANALYSES ET DISCUSSION

6.1 Généralités

Les résultats des essais au laboratoire permettent de déduire certaines caractéristiques hydrogéologiques du matériau en fonction de ses propriétés de base. Outre les essais de caractérisation en laboratoire (chapitres 3, 4 et 5), cette étude comporte aussi un volet d'analyse incluant quelques modélisations numériques présentées et discutées dans ce chapitre.

Les résultats pour les essais standards et les calculs basés sur les méthodes de prédiction de la conductivité hydraulique saturée k_{sat} et de la courbe de rétention d'eau [CRE] ont été présentés au chapitre 3. Ces mesures incluent la distribution granulométrique, la densité relative des grains, la conductivité hydraulique saturée et le poids volumique sec (avec indice des vides).

La distribution granulométrique donne un coefficient d'uniformité C_U de 17,9 pour les roches stériles tamisées utilisées dans ce projet; le matériau est donc très étalé. La surface spécifique S_s qui est utilisée dans les équations de prédiction (voir équation 2-1) est de 17,4 m²/kg. La densité relative des grains D_r est de 2,747.

Les modèles de prédiction Kozeny-Carman [KC] et Kozeny-Carman modifié [KCM] ont été appliquées à partir des données provenant des essais normalisés. La conductivité hydraulique saturée k_{sat} moyenne des roches stériles tamisées selon les essais de perméabilité est de $8,9 \times 10^{-3}$ cm/s, alors que les prédictions sont $2,8 \times 10^{-3}$ cm/s [KC] et $2,0 \times 10^{-3}$ cm/s [KCM]; la corrélation entre les essais et les méthodes prédictives est relativement bonne. Les résultats des essais de perméabilité en colonnes ont mené à une conductivité hydraulique saturée moyenne $k_{sat-moy}$ de $3,8 \times 10^{-3}$ cm/s (voir tableau 5.2); cette valeur est proche des valeurs prédites.

Les essais de type Proctor standard et modifié ont permis de déterminer la densité sèche maximale. Le poids volumique sec maximal γ_{d-max} est de 21,28 kN/m³ pour l'essai Proctor standard à une teneur en eau massique w de 6,5% et de 22,08 kN/m³ pour l'essai Proctor modifié à une teneur en eau massique w de 6,9%.

Les protocoles expérimentaux pour les essais en cuve et en colonne ont été présentés au chapitre 4. Les essais menés sur le montage M1 ont permis d'améliorer la procédure et les méthodes d'obtention des données pour les montages M2 et M3. Il est nécessaire d'analyser avec discernement les données obtenues lors des essais dans le montage M1 puisque le manque d'expérience a mené à un manque de précision pour plusieurs données.

Le montage des essais en cuve et des colonnes permet de contrôler plusieurs facteurs afin de faciliter les comparaisons et la validation des essais. Le niveau de compactage dans les essais en cuve et en colonne a notamment été contrôlé; le degré de compactage a été modifié pour le montage de chacune des cuves; ce niveau a aussi été contrôlé pour les stériles dans les colonnes pour obtenir approximativement le même degré de compactage.

Le montage des colonnes est plus ardu dû à la nécessité qu'elles soient étanches à l'air et à l'eau et toutes les ouvertures devaient être scellées. La saturation du matériau avec l'eau désaérée est aussi une étape délicate et plusieurs précautions ont été prises pour limiter la migration des particules fines pendant le mouillage. Malgré toutes les précautions, le degré de saturation des stériles dans les colonnes est demeuré bien inférieur à 100%; certaines données ont été corrigées en fonction du degré de saturation moyen pour chaque colonne (comme k_{sat}). Mais ce degré de saturation trop faible a sans doute affecté la qualité des résultats obtenus des essais en colonne.

6.2 Interprétation

6.2.1 Essais en cuve

Tel que mentionné au chapitre 5, il a été observé que plus le matériau a subi des efforts de compactage élevé, plus il faut du temps pour que l'eau traverse le matériau (en raison de la porosité plus faible). Aussi, il a été observé lors des essais en cuve que la teneur en eau volumique θ_v à la fin des essais pourrait avoir été influencée par la densité en place Υ_d .

Les caractéristiques des roches stériles pendant les essais de drainage et au moment du démontage de chacune des trois cuves ont été compilées afin de comparer les valeurs mesurées

en fonction du degré de compactage. Les valeurs présentées dans les figures 6-1 à 6-6 sont divulguées aux tableaux 5.10, 5.15 et 5.20 du chapitre précédent.

Le temps d'arrivée de l'eau d'infiltration au point d'exfiltration est représenté dans la figure 6.1 pour chacun des essais et des montages de la cuve (à des degrés de compactage différents pour chaque montage. Puisque la cuve était pleine d'eau avec une charge positive pour l'essai E2, l'eau commence à s'écouler au moment de l'ouverture de la valve au bas de la cuve (au temps $t = 0$ s). La figure 6.1 démontre que le matériau plus dense requiert plus de temps pour que l'eau atteigne le point de drainage. Le temps requis avant que l'eau commence à sortir au bas de la cuve est réduit lorsque le matériau a été humidifié (essai de drainage fait au préalable). Il est possible que ce phénomène soit dû à une condition d'écoulement influencée par la teneur en eau initiale.

La porosité n des roches stériles dans la cuve du montage M3 se rapproche le plus de celle obtenue en colonnes avec une variation entre 23% et 29% ($\pm 3\%$). La porosité n pour les montages M1 et M2 sont plus élevée, elles varient entre 30% à 35% ($\pm 3\%$).

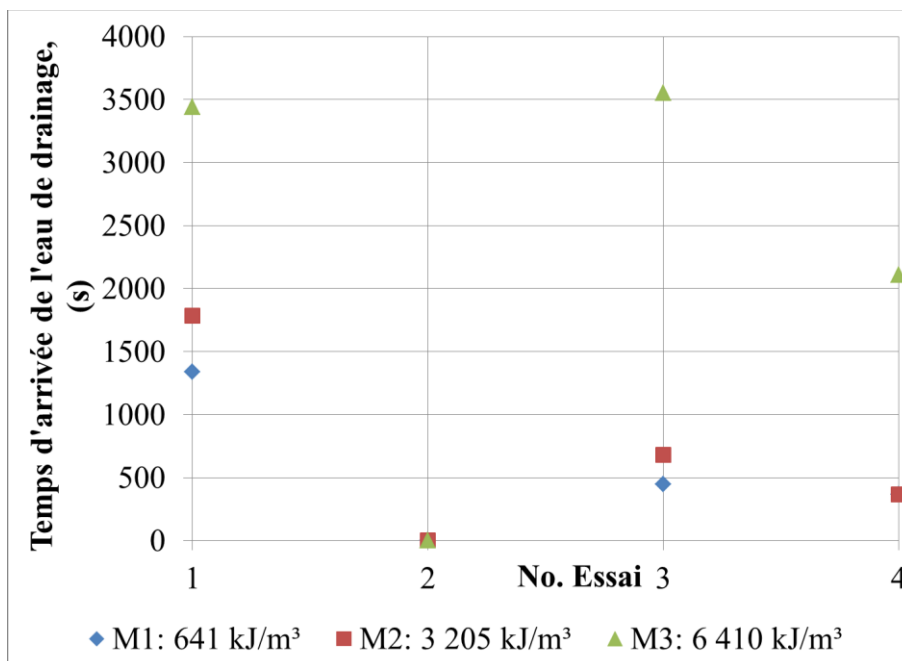


Figure 6.1 : Temps d'arrivée de l'eau de drainage au point d'exfiltration pour chacun des essais d'infiltration selon l'énergie de compactage (kJ/m^3) appliqué au montage de la cuve sur les roches stériles.

La figure 6.2 montre que les premiers essais dans chaque cuve libèrent plus de sédiments pendant l'infiltration et le drainage. Ceci pourrait être un indice de la migration des particules fines à travers le matériau. Le total des sédiments libérés au cours des trois essais représente 0,09% (en partie) des roches stériles utilisées pour les essais. Les sédiments disponibles pour la migration sont surtout évacués lors des essais E1 et E2; peu de sédiments sont libérés lors des essais E3 et E4. Peregoedova (2012) traite de cet aspect; ce volet n'a pas été évalué spécifiquement dans l'étude présentée ici puisque la proportion n'est pas significative.

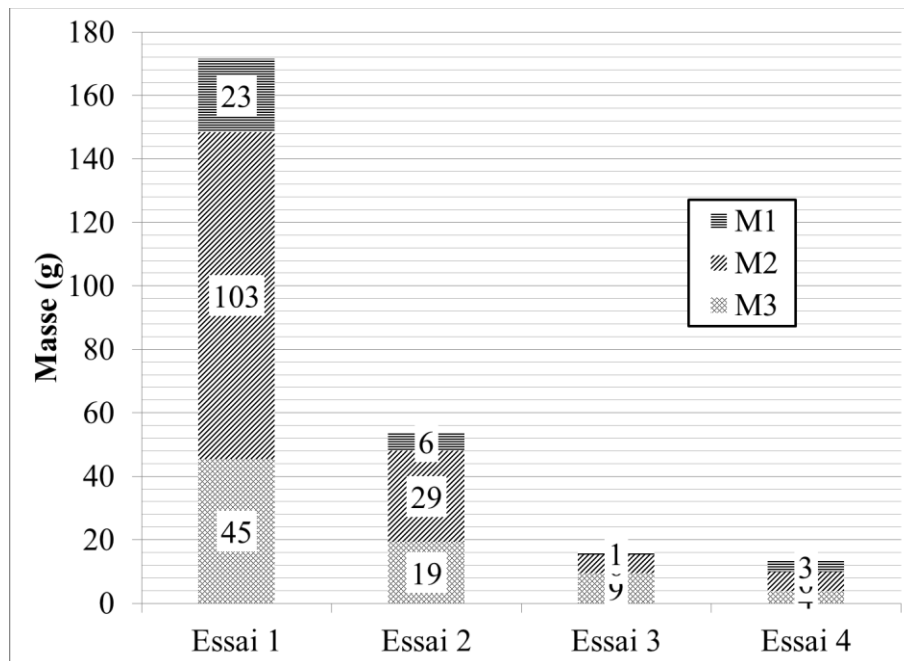


Figure 6.2 : Quantité cumulative de sédiments fins récupérés dans l'eau de drainage lors de chacun des essais pour chaque montage dans la cuve qui représente 0,09% de la masse totale de matériau pour les trois montages combinés.

La distribution granulométrique des grains a été mesurée lors du démontage des cuves figure 6.3. Les granulométries des roches stériles dans la cuve sont pratiquement les mêmes pour les trois montages, même s'il y a de légères différences. Selon la figure 6.3, il pourrait y avoir une légère augmentation des particules fines d'un montage à l'autre. Il a été noté pendant le compactage que certaines particules des roches stériles étaient friables; les particules ont pu se dégrader lors du compactage.

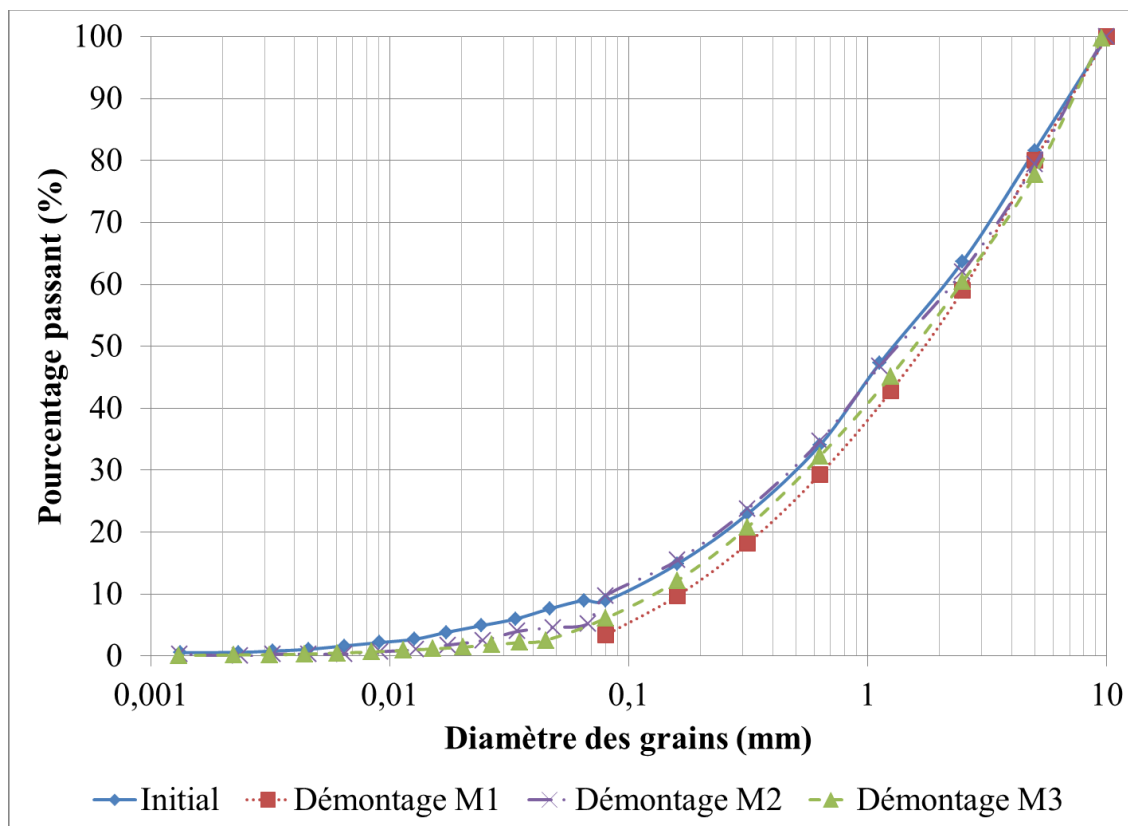


Figure 6.3 : Distribution granulométrique des roches stériles initiale et suite au démontage de chacun des essais en cuve.

Les distributions granulométriques montrés à la figure 6.3 montrent qu'il y a peu de variation entre chacun des essais; ces faibles variations pourraient néanmoins avoir un impact sur la conductivité hydraulique du matériau. Les conductivités hydrauliques saturées ont été prédites pour chacune des distributions granulométriques, à l'exception de M1 (car aucun essai à l'hydromètre n'a été effectué.) Le modèle de prédiction Kozeny-Carman [KC] a été utilisé pour faire les prédictions pour diverses porosités. Le coefficient d'uniformité C_U et la surface spécifique S_s pour chaque granulométrie ont aussi été calculés et sont présentés au tableau 6.1. Il y a une importante variation de la S_s et du C_U de chaque granulométrie.

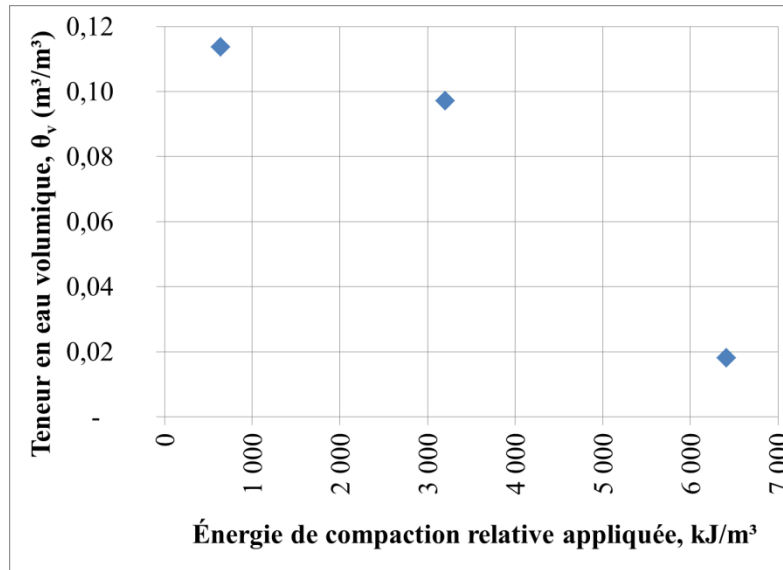
Tableau 6.1 : Prédiction de la conductivité hydraulique saturée à l'aide du modèle KC pour différentes distributions granulométriques (voir courbes granulométriques à la figure 6.3)

Porosité, n	k_{sat} (initiale)	k_{sat} (M2)	k_{sat} (M3)
	cm/s	cm/s	cm/s
0,17	1,4E-04	5,2E-04	7,9E-04
0,23	4,0E-04	1,5E-03	2,3E-03
0,30	1,1E-03	4,0E-03	6,1E-03
0,37	2,5E-03	9,4E-03	1,4E-02
C_U	11,3	30,0	27,8
S_s (m ² /kg)	36,6	18,9	15,4

Les mesures lors du démontage des essais en cuve, du volume de matériau extrait et des mesures de teneur en eau associées, ont été exprimées en fonction de l'énergie de compactage appliqué sur la figure 6.4a. Cette relation suppose qu'il y a un lien entre la teneur en eau volumique à la fin des essais, θ_v (près de la teneur en eau volumique résiduelle θ_r) au moment du démontage, et la densité en place. Ce lien serait dû à la porosité réduite lorsque l'énergie de compactage est plus élevée. La figure 6.4b présente la densité sèche obtenue à l'aide de deux méthodes, basées sur le volume de matériau et la teneur en eau massique, et sur l'essai au cône de sable. Les résultats sont très différents avec ces deux méthodes. Une analyse de ces résultats serait requise pour établir la raison de la disparité entre les résultats au cône de sable et ceux obtenus avec le volume de matériau extrait de la cuve et la teneur en eau massique.

L'axe de droite de la figure 6.4b montre la relation entre la porosité et la teneur en eau volumique du matériau au moment du démontage.

- a) Teneur en eau volumique au démontage de chaque cuve en fonction de l'énergie de compactage appliquée.



- b) Densité sèche (axe de gauche) et porosité (axe de droite) au démontage de chaque cuve en fonction de la teneur en eau volumique.

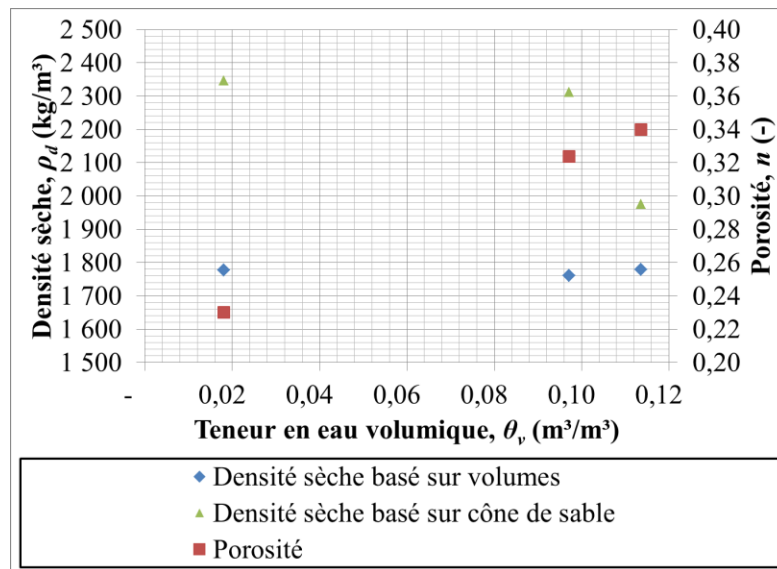


Figure 6.4 : Teneur en eau volumique θ_v au démontage en fonction de l'effort de compactage lors du montage de la cuve; de la densité sèche ρ_d et la porosité n au démontage sont aussi montrée.

La figure 6.5 montre les valeurs des teneurs en eau volumique θ_v mesurées au démontage à partir de la teneur en eau massique w ($\theta_v = w(1-n)D_r$), versus celles déduites des sondes diélectriques. Il y a une bonne relation entre les deux méthodes d'évaluation de la teneur en eau volumique. Cette relation permet de valider la calibration des sondes diélectrique avec les valeurs mesurées. La précision des valeurs mesurées selon w serait de $\pm 0,04$ et de $\pm 0,03$ pour les valeurs obtenues avec les sondes. La précision des sondes diélectriques en utilisant l'équation de Topp (Decagon, 2012) est de $\pm 0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Selon Decagon, cette précision peut être améliorée jusqu'à $\pm 0,01$ avec une calibration détaillée. La figure 6-5 montre que les valeurs se retrouvent dans l'écart de précision de $\pm 0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ du fabricant même si une calibration des sondes a été faite au laboratoire avec le matériau testé. La droite partant de zéro sur la figure 6.5 indique que les valeurs de teneurs en eau volumique se maintiennent dans la marge d'erreur de $\pm 0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ des mesures directes avec les sondes.

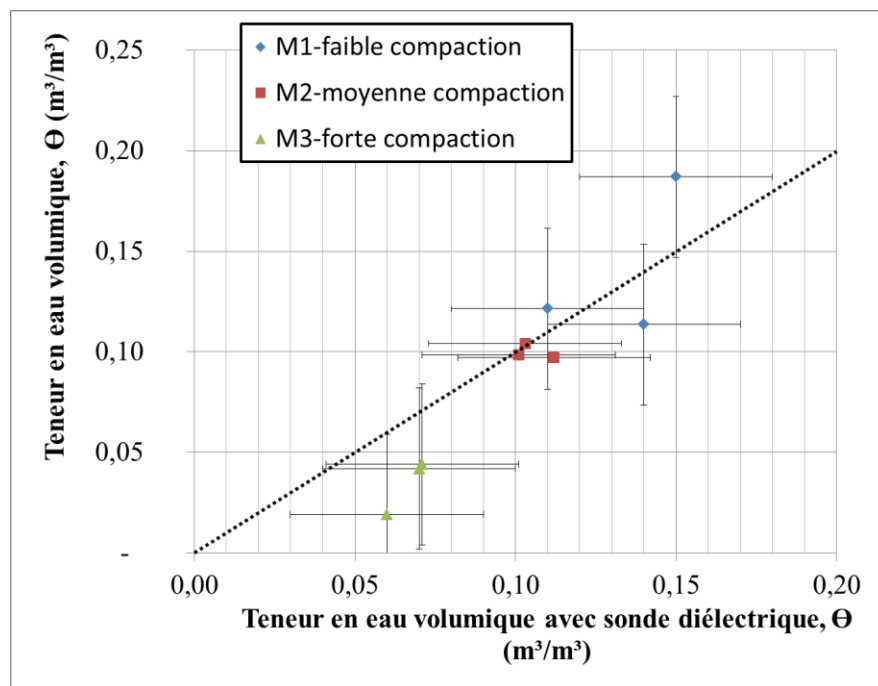


Figure 6.5 : Valeurs de la teneur en eau volumique obtenues par les mesures directes (selon w) et avec les sondes diélectriques Decagon lors du démontage de chacune des cuves (M1, M2 et M3). La marge d'erreur (la précision) des mesures est indiquée à l'aide des barres.

La relation entre le poids unitaire sec γ_d (axe-y) et l'indice des vides e (axe-x) aux démontages des cuves, montré à la figure 6.6, est semblable aux relations obtenues suite aux essais de référence pour l'obtention de la densité maximale du matériau en fonction de l'énergie appliquée. Le tableau 6.2 démontre les relations entre chacun de ces paramètres pour les essais effectués aux démontages et aux essais de référence. La relation linéaire entre le poids unitaire sec γ_d et l'indice des vides e est semblable pour les trois types d'essais effectués. Un sommaire des principales mesures lors des essais de drainages E2 est présenté au tableau 6.2. Le tableau 6-3 montre que la porosité n et l'indice des vides e diminue avec l'augmentation du poids unitaire sec γ_d . La relation fondamentale entre le poids unitaire sec et l'indice des vides est le suivant :

$$\gamma_d = -\gamma_d \bullet e + (D_r \bullet \gamma_w) = -\gamma_d \bullet e + (2,74 \bullet 9,787 \text{ kN/m}^3) = -\gamma_d \bullet e + 24,9 \text{ kN/m}^3.$$

$$\gamma_d = 24,9 / (1+e)$$

Les résultats au laboratoire présentés à la figure 6.6 sont cohérents avec l'équation fondamentale.

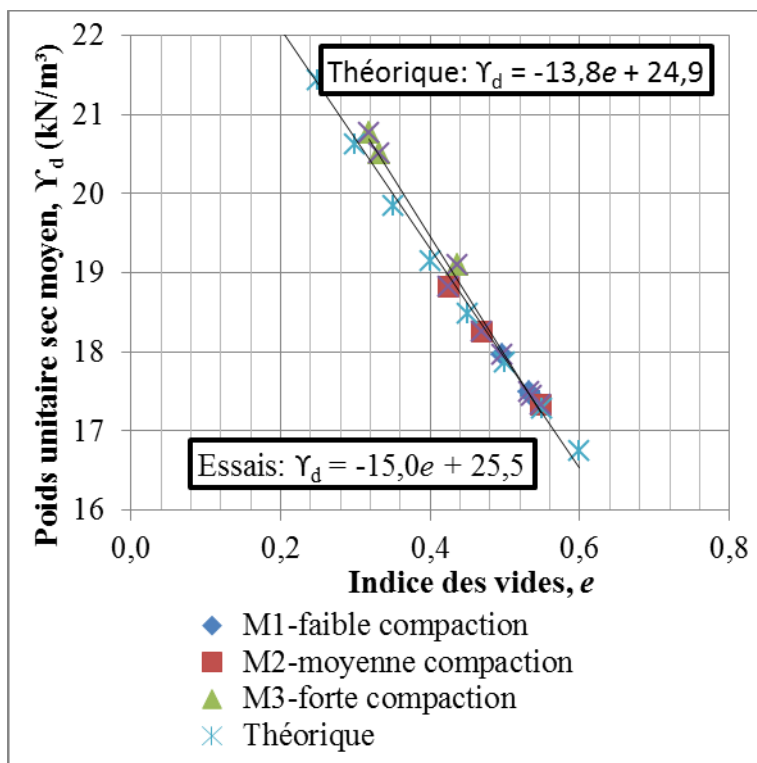


Figure 6-6 : Relation entre le poids unitaire sec γ_d et l'indice des vides e au démontage des essais M1, M2 et M3.

Tableau 6.2 : Relations entre le poids unitaire γ_d (kN/m³) et l'indice des vides e pour les mesures aux démontages et aux essais normalisés.

Essai	Relation linéaire (γ_d - poids unitaire sec, e - indice des vides)
Théorique	$\gamma_d = -13,8e + 24,9$
Démontages	$\gamma_d = -15,0e + 25,5$
Proctor standard (ASTM D698-12)	$\gamma_d = -16,4e + 25,6$
Proctor modifié (ASTM D1557-07)	$\gamma_d = -17,6e + 25,8$

Le tableau 6.3 présente un sommaire des résultats principaux obtenus lors des essais de drainage E2 pour chacun des montages. Les vitesses d'infiltration représentent la relation presque linéaire au début de l'essai lorsqu'il y a une charge d'eau à la surface du matériau, c'est-à-dire pendant la durée de l'infiltration. Les valeurs de porosité, indice des vides et poids

unitaire sec proviennent des mesures au démontage de chaque cuve. Le taux d'infiltration a été calculé selon la méthode de Green et Ampt (1911) décrite à la section 2.2, et présenté au tableau 6.4. Le volume d'eau total correspond à l'eau drainée au bas de la cuve par l'exutoire; l'épaisseur du matériau est donné par l'épaisseur des trois (3) couches au montage de chaque cuve.

Tableau 6.3 : Sommaires des mesures principales pour les essais de drainage E2

Essais E2	Vitesse infiltration (cm/s)	Durée infiltration, t (s)	Charge hydraulique initiale, h (cm)	Porosité, n (%)	Indice des vides, e (-)	Poids unitaire sec, γ_d (kN/m ³)
M1	0,0033	01:10:00	12	0,34	0,52	17,7
M2	0,0024	01 :23 :00 à 01 :33 :00	13,4	0,32	0,47	18,1
M3	0,0027	01:30:00	16,4	0,23	0,30	20,1

Tableau 6.4 : Taux d'infiltration calculé selon Green et Ampt 1911 (équation 2-18)

	Volume d'eau total récupéré en dehors de la cuve	Charge hydraulique initiale, h_0	Épaisseur zone mouillée, z_f	Taux d'infiltration, i
	cm ³	cm	cm	cm/s
M1E2	105 869	12	30,6	5,3E-03
M2E2	101 352	13,4	31,2	5,4E-03
M3E2	118 523	16,4	29,5	5,9E-03
k_{sat}	3,8E-03	cm/s		
h_f	0	cm		

6.2.2 Essais en colonne

Avec les essais en colonne nous avons pu observer, comme dans les cuves, que la porosité est inversement proportionnelle à la densité en place ($n \propto 1/\gamma_d$).

Les essais de perméabilité et de drainage en colonne ont permis d'obtenir plusieurs informations relatives à la conductivité hydraulique et à la courbe de rétention d'eau. La hauteur de la frange capillaire dans les colonnes se situe entre 22 et 26 cm, et la succion résiduelle ψ_r se situe entre 28 et 37 cm H₂O, voir figure 6.7. Les essais de perméabilité en colonne ont été effectués à un degré de saturation variant entre 60 et 70%, la conductivité hydraulique directe moyenne avant corrections est de $2,5 \times 10^{-4}$ cm/s. Lorsque le coefficient de perméabilité est converti en conditions saturées avec l'équation de Mualem (1976) et à une température ambiante de 20°C, il est de $8,9 \times 10^{-3}$ cm/s.

Les données mesurées des CRE sont comparées aux valeurs prédites à l'aide des modèles MK et MKs (figure 6.7) et dans le tableau 6.5. Une comparaison de tous les résultats de CRE avec les modèles de prédiction MK et MKs sont présentés à la figure 6.7. Les CRE prédites par MK et MKs à la figure 6.7 sont présentées pour une teneur en eau volumique saturée de $\theta_s = 0,19$. Les valeurs de CRE lissées par le logiciel RETC et les résultats des essais en colonnes sont aussi présentées dans la figure 6.7 pour des fins de comparaisons. On observe que les résultats avec les prédictions MK et MKs sous-évaluent la teneur en eau volumique résiduelle θ_r . À noter que les CRE présentées à la figure 6.7 sont basées sur des essais de drainage pour lesquels le degré de saturation maximal était 'environ 70% ; ceci explique les faibles valeurs de teneur en eau volumique « saturée » rapportée ici.

Tableau 6.5 : Valeurs d'entrée d'air (ψ_a) et d'eau (ψ_r)

	CRE-A et B avec RETC	MK et MK_s
ψ_r (cm H ₂ O)	41 à 54	~ 40
ψ_a (cm H ₂ O)	7,6 à 7,8	~ 10
θ_r	0,08	0,03 à 0,04

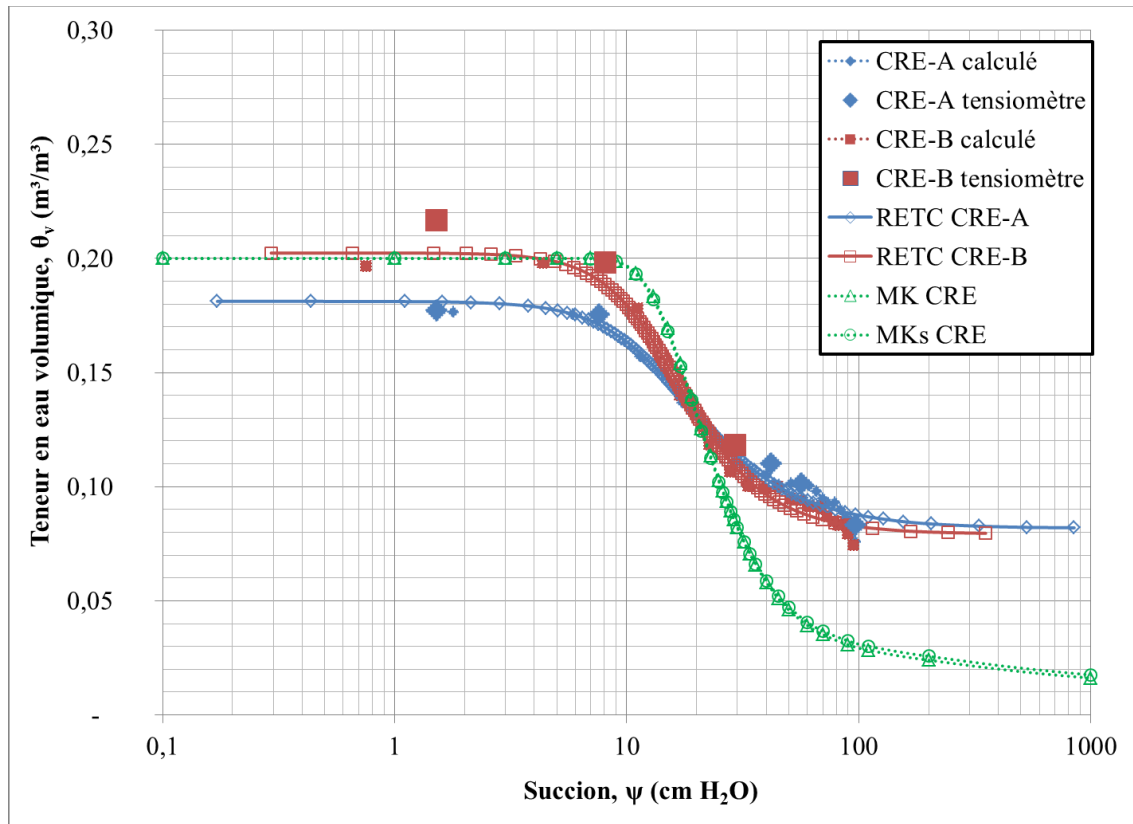


Figure 6.7 : Comparaison des CRE mesurées et prédites

6.3 Analyses numériques

Les essais de drainage réalisés dans la cuve [E2] ont été reproduits à l'aide d'une modélisation numérique avec le logiciel Seep/W de GeoSlope International version 2007. La modélisation numérique peut permettre de mieux comprendre les processus qui prennent place pendant l'essai et identifier les paramètres qui gouvernent les résultats. Les données de laboratoire ont été simplifiées pour appliquer le modèle. Les essais où l'infiltration d'eau s'est faite par l'infiltromètre n'ont pas été reproduits avec la modélisation numérique (i.e. essais E1, E3 et E4). Les résultats des simulations numériques pour les essais en cuve M1E2, M2E2 et M3E2 sont présentés à l'annexe E et quelques principaux résultats sont présentés ici.

De façon générale, on peut dire que la simulation numérique ressemble aux résultats obtenus au laboratoire pour les essais M1E2, M2E2 et M3E2 à l'exception de la teneur en eau

volumique initiale. Les modèles numériques reposent sur des conditions homogènes, initialement saturées et isotropes, en utilisant les résultats obtenues des essais en colonnes pour k_{sat} corrigée à un degré de saturation de 100%. Le matériau est donc modélisé comme étant saturé en conditions initiales (avec charge d'eau initiale en surface); mais les essais au laboratoire n'étaient pas initialement en conditions saturées. Les essais en cuve ont été effectués avec un total de 15 sondes diélectriques insérées dans les roches stériles afin de suivre les teneurs en eau volumique θ_v pendant les essais. Les sondes et les fils peuvent former des zones d'écoulements préférentiels en partie dus à la variation de la porosité n autour de ces éléments. Le matériau peut donc être hétérogène, même si des précautions ont été prises afin de conserver le plus d'uniformité que possible avec le matériau environnant les sondes.

6.3.1 Propriétés des matériaux

Les propriétés hydrauliques utilisées dans la modélisation numérique ont été tirées des résultats des essais en cuve et en colonne. Les propriétés des roches stériles dans le modèle numérique sont les fonctions de CRE présentées à la figure 6.8. Les fonctions de conductivité hydraulique ont été estimées par la méthode de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980), avec les paramètres obtenus par optimisation à partir de la CRE, à l'aide du logiciel RETC (voir section 5.2 et figure 6.9). Ces courbes sont celles évaluées par le lissage des données de laboratoire avec le modèle RETC (van Genuchten et al., 1991, 2009). Les CRE et les fonctions de perméabilité sont différentes pour chaque montage puisque la porosité variait avec l'énergie de compactage au montage. La vitesse de drainage pour chaque essai est basée sur le taux d'infiltration pour chaque montage lors de l'essai E2.

Les courbes de la fonction de conductivité hydraulique et les CRE ont été légèrement modifiées pour éviter qu'il y ait des valeurs identiques entre les points, ce qui permet au modèle numérique de converger vers une solution.

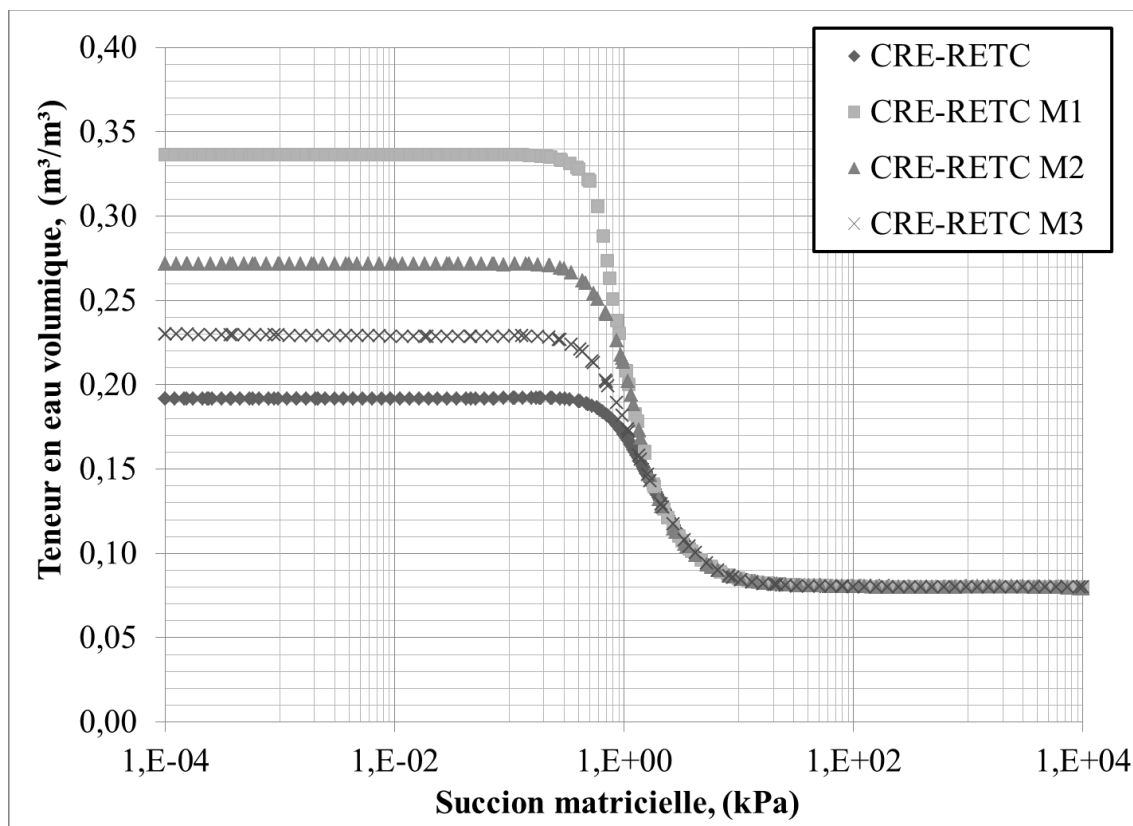


Figure 6.8 : Courbes de rétention d'eau utilisées pour la modélisation numérique des roches stériles.

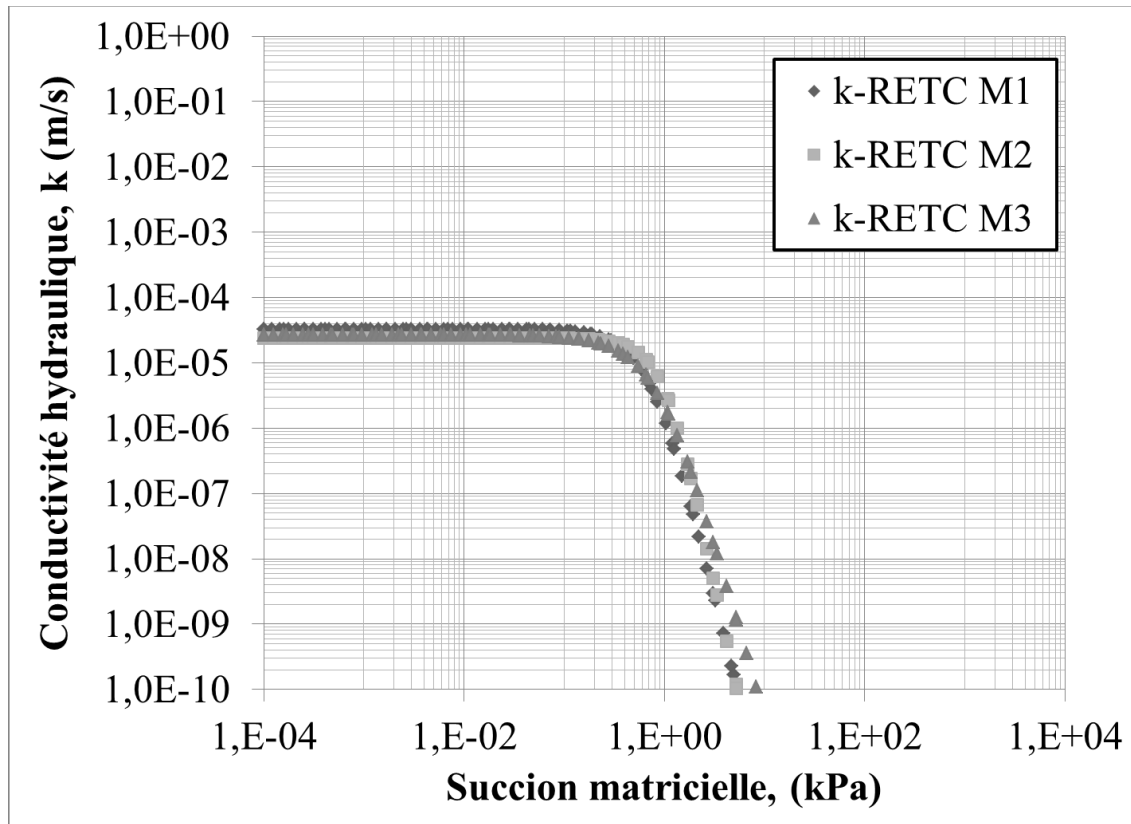


Figure 6.9 : Fonction de la conductivité hydraulique appliquée aux roches stériles dans les modèles numériques.

6.3.2 Modèle numérique

Un modèle d'éléments finis a été préparé à l'aide du logiciel SEEP/W. Les caractéristiques du modèle sont les suivantes :

- Axisymétrique, avec un rayon de 45,5 cm et une hauteur de 30 cm.
- Maillage rectangulaire avec éléments de 1 cm maximum. Le maillage a été raffiné près des parois, de la surface et des interfaces matériaux. La figure 6.12 illustre le maillage utilisé pour la cuve. Le modèle contient 1 583 éléments rectangulaires et 1 662 nœuds.
- Matériau homogène; la courbe de rétention d'eau et la fonction de conductivité hydraulique ont été estimées à partir des résultats des essais de perméabilité et

de drainage, tel que présenté aux figures 6.10 et 6.11. Les essais de drainage [E2] pour les montages M1, M2 et M3 ont été simulés.

- Le modèle a été simplifié en plaçant le matériau à la base comme étant saturé et où l'eau se déplace vers la sortie sur la paroi externe. Puisque le modèle est axisymétrique le point de sortie de la paroi externe est traité comme faisant la circonférence de la cuve. Le taux d'infiltration en surface, enregistré lors des essais de drainage a été introduit dans le modèle.
- Régime permanent:
 - Condition initiale (régime permanent)
 - En haut (surface) : charge $h_{M1} = 0,125$ m, $h_{M2} = 0,122$ m, $h_{M3} = 0,150$ m
 - En bas : imperméable
 - Côtés : imperméable
- Régime transitoire :
 - Conditions initiales en régime permanent
 - En haut (surface) : conditions initiales en régime permanent
 - Matériau saturé au bas de la cuve : fonction de l'écoulement enregistrée selon le montage (soit M1, M2 ou M3), charge totale versus temps.
 - Scénarios utilisés pour la modélisation en régime transitoire : 100 étapes de temps, début à intervalles de 60 secondes, ensuite augmentation des intervalles exponentiellement, et jusqu'à 100 000 secondes.

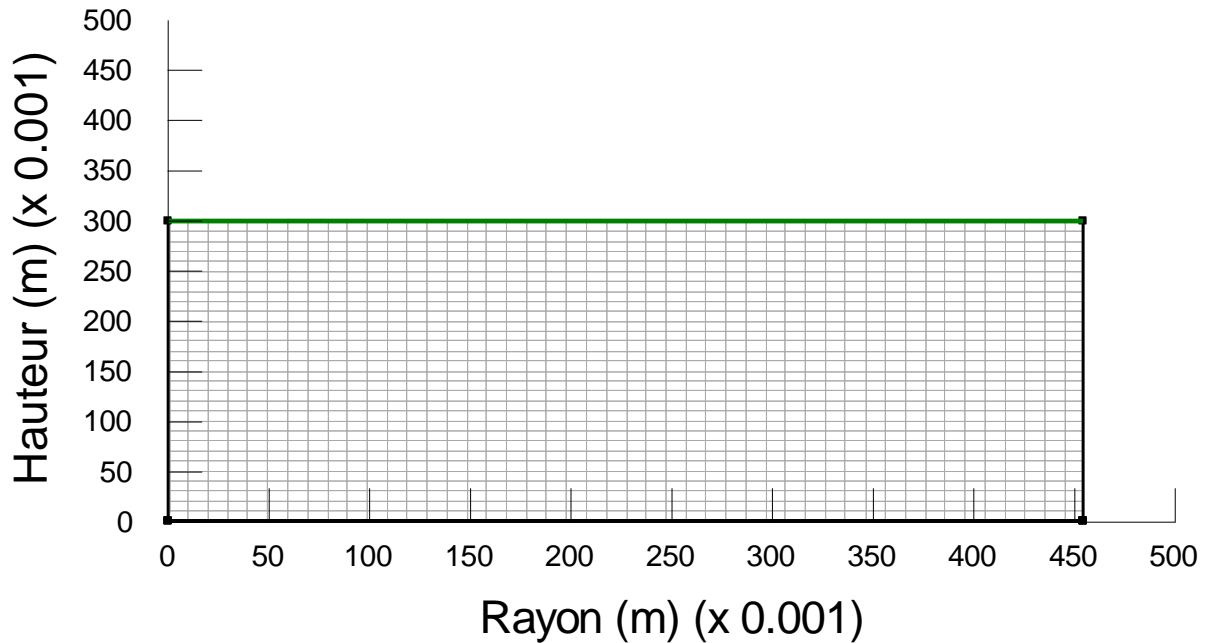


Figure 6.10 : Maillage utilisé pour le modèle représentant les essais en cuve (axisymétrique), taille maximale des éléments de 1 cm.

6.3.3 Résultats des simulations

Une analyse de l'évolution de la teneur en eau volumique est montrée aux figures 6.11 à 6.13 lorsque la cuve est remplie d'eau et qu'un drainage libre au bas de la cuve est appliqué. On observe dans ces figures que le temps nécessaire pour approcher la valeur d'équilibre est fonction de la teneur en eau volumique θ_v . Les résultats des modèles numériques (colonne de gauche) sont mis côte à côte avec les résultats obtenus au laboratoire (colonne de droite), soit les figures 6.11 à 6.13. On observe que les matériaux plus denses prennent plus de temps pour atteindre l'équilibre (i.e. atteindre les conditions de la CRE) que ceux moins denses. Le fond de la cuve se maintient à un degré de saturation élevée pendant la durée totale des essais pour tous les montages. En général, les modèles numériques représentent assez bien les tendances des essais exécutés au laboratoire. Les modèles numériques montrent les résultats basés sur les propriétés du matériau en condition saturées et selon les résultats des essais en colonnes ce qui crée une différence pour la vitesse de drainage et la porosité initiale des résultats de modélisation numérique. À partir des résultats montrés aux figures 6.11, 6.12 et 6.13, on peut

retirer quelques observations en lien avec la teneur en eau volumique [TEV] pour les essais de drainage [E2] :

- L'effet de la porosité sur les écoulements se manifeste dans les modèles numériques (TEV initial reflète la porosité du matériau saturé), mais peu dans les essais au laboratoire (porosité effective plus faible que la porosité saturée). Ceci pourrait être dû au degré de saturation du matériau qui n'est pas à 100% au début de l'essai au laboratoire, alors que le modèle, assume que le matériau est saturé.
- Le débit d'écoulement simulé est plus lent que pour les essais au laboratoire. Ceci pourrait être expliqué par des écoulements préférentiels dus à certaines hétérogénéités lors des essais de laboratoire. À noter que lorsque le degré de compactage est plus élevé [M3], les résultats du modèle ressemblent plus aux résultats obtenus au laboratoire.
- Temps écoulé avant le début de la désaturation (atteinte de l'AEV) au bas de la cuve est comparable entre la modélisation numérique et les essais au laboratoire. Cette similitude peut être reliée à l'homogénéisation du degré de saturation et de compactage du matériau au fond de la cuve, ce qui peut s'apparenter aux conditions idéales de la modélisation numérique.
- Les TEV à la fin des essais sont pratiquement similaires pour les modèles numériques et les essais au laboratoire à la surface de la cuve; le matériau en surface devrait s'approcher des conditions résiduelles. .

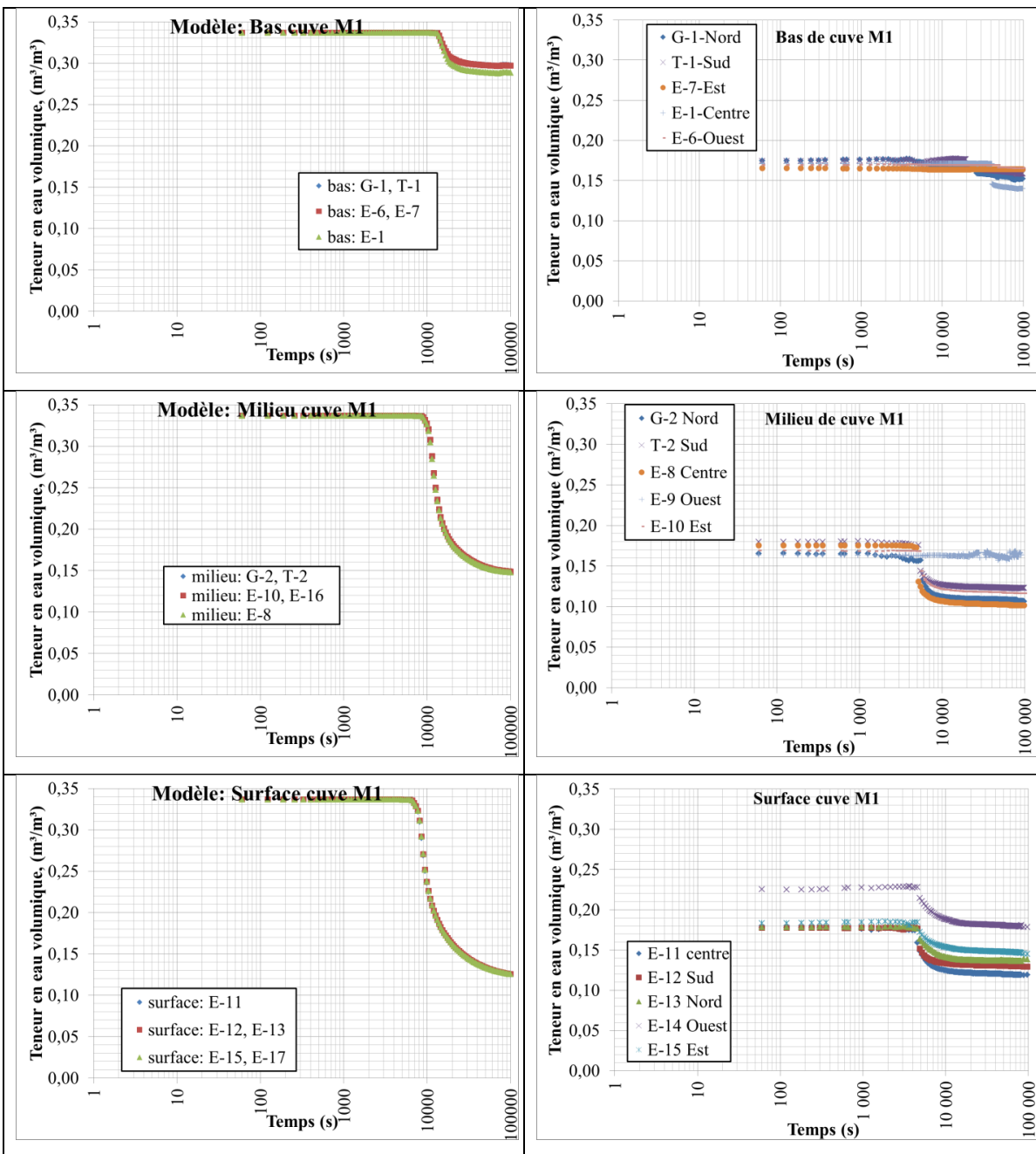


Figure 6.11 : Valeurs des TEV en fonction du temps obtenues des modèles numériques (colonne gauche) et des essais en cuve (colonne droite) au laboratoire pour le montage M1E2 à divers endroits (localisation des sondes selon section 5.2).

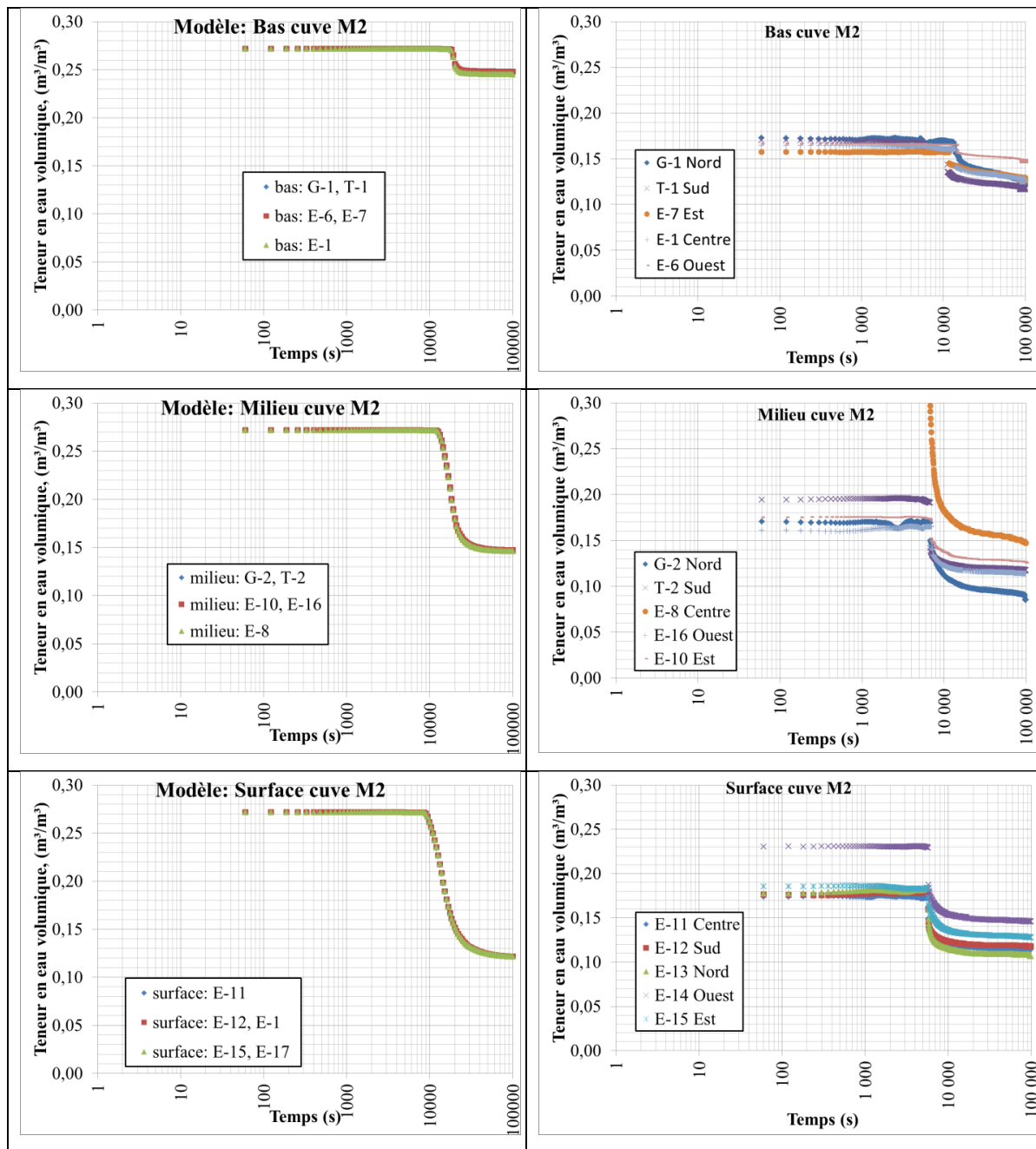


Figure 6.12 : Valeurs des TEV en fonction du temps obtenues des modèles numériques (colonne gauche) et les essais en cuve (colonne droite) au laboratoire pour le montage M2E2 à divers endroits (localisation des sondes selon section 5.2).

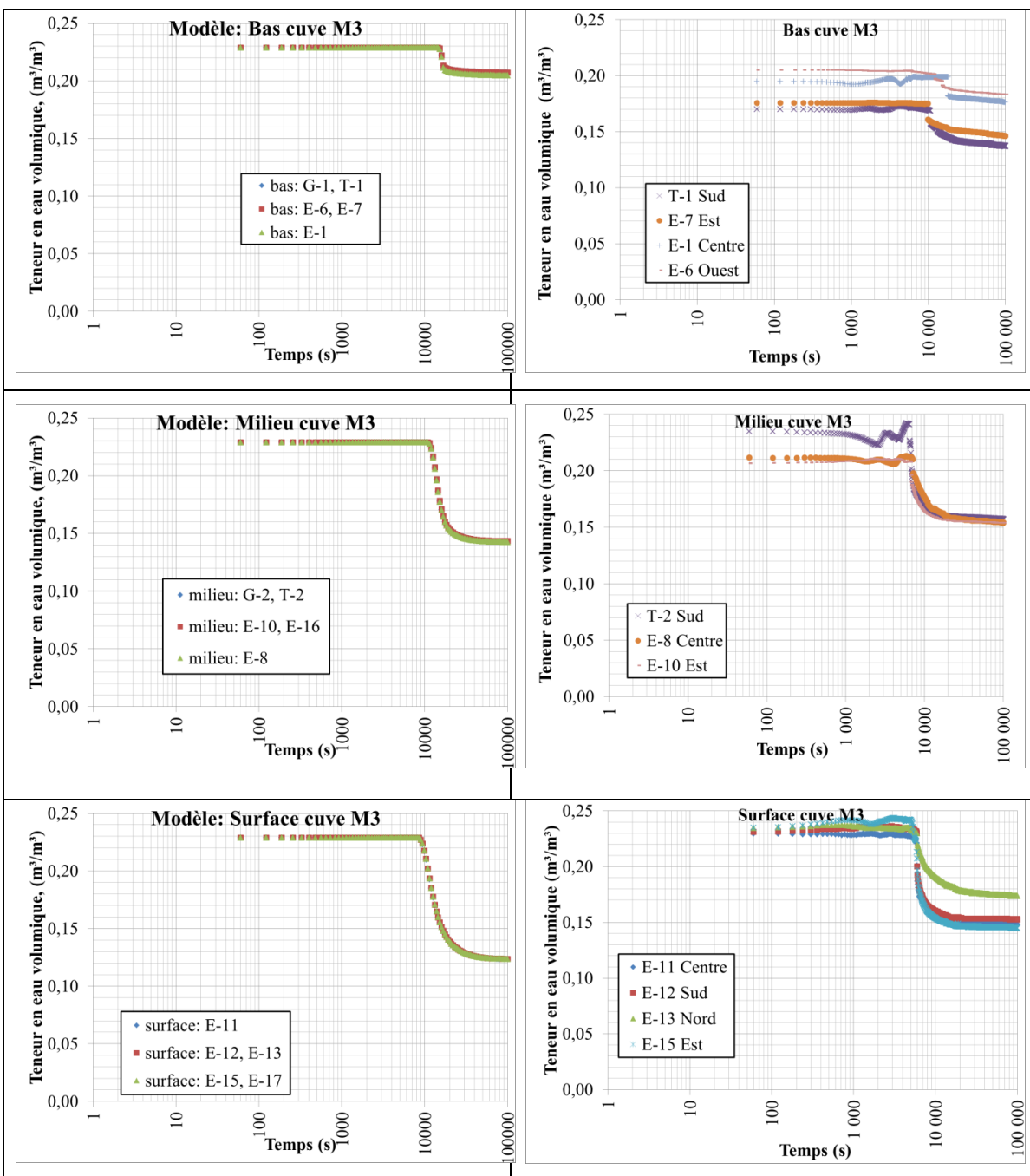


Figure 6.13 : Valeurs des TEV en fonction du temps obtenues des modèles numériques (colonne gauche) et les essais en cuve (colonne droite) au laboratoire pour le montage M3E2 à divers endroits (localisation des sondes selon section 5.2).

Les écoulements simulés et les mesures lors des essais en laboratoire sont présentés à la figure 6.14 à différents intervalles de temps. On peut observer sur la figure 6.14 que les débits d'écoulement pour M1E2 et M2E2 sont plus rapides par rapport à M3E2 qui a un écoulement plus lent, mais soutenu plus longtemps. La figure 6.14 montre les débits d'écoulements avec la modélisation numérique (a et b) et lors des essais de laboratoire (c et d). Les figures a et c montrent les données au temps 0 à 100 000 secondes sur une échelle logarithmique, alors que les figures b et d montrent les données au temps 0 à 10 000 secondes sur une échelle normale. À noter que l'échelle utilisée pour représenter les débits de drainage sur la figure 6.14 est différente pour les simulations numériques et les essais au laboratoire car les essais au laboratoire sont plus rapide, mais on peut tout de même noter que les tendances sont semblables entre la modélisation numérique et les essais au laboratoire. Quelques ajustements des caractéristiques du matériau avec des analyses plus poussés des résultats pourront pallier cette différence. Quelques tendances générales ont été notées :

- Les simulations numériques et les résultats des essais de laboratoire montrent tous les deux que l'écoulement est plus rapide dans M1 au début de l'essai que M2 et M3;
- Débit de sortie d'eau diminue plus rapidement dans les essais au laboratoire que pour les simulations;
- Les valeurs obtenues des essais au laboratoire ne sont pas aussi uniformes que les courbes des simulations numériques; ceci pourrait être dû à l'hétérogénéité dans le matériau.

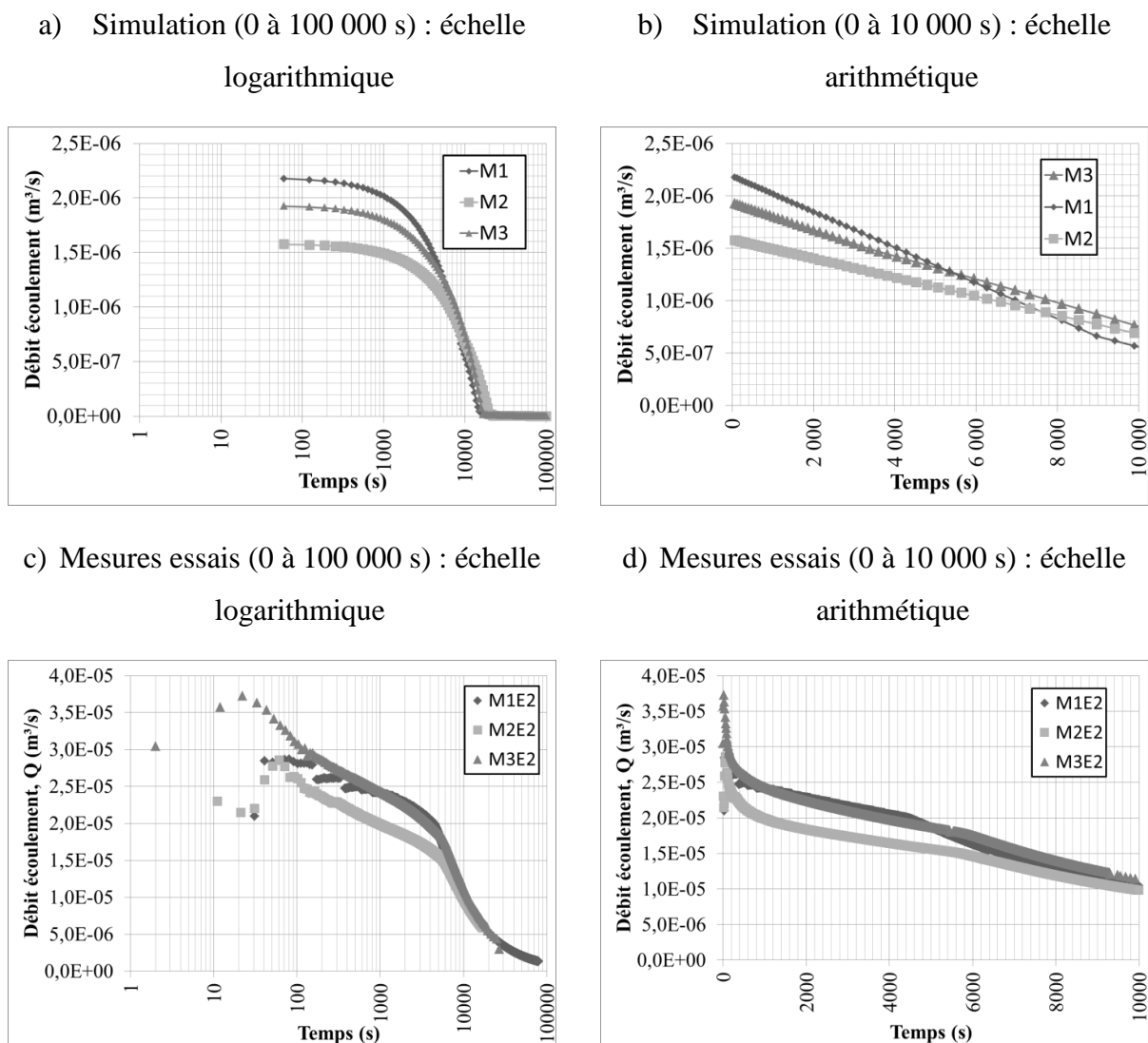


Figure 6.14 : Débits de sorite au point d'exfiltration en fonction du temps pour les montages M1E2, M2E2 et M3E2 obtenues à partir du modèle numérique et des essais en cuve.

6.4 Discussion

Actuellement, un projet de construction de haldes à stériles expérimentales est en cours à la mine du Lac Tio. Au cours des prochaines années, une série de projets de recherche permettra de déterminer la configuration idéale pour les haldes à stériles de ce site afin de diminuer les écoulements d'eau à travers les haldes et ainsi diminuer la production d'écoulement de type DNC. L'objectif du projet actuel porte sur la caractérisation physique et l'observation du comportement hydrogéologique dans les roches stériles tamisées et compactées. Le but

spécifique éventuel est de pouvoir déterminer le degré de compactage requis pour un recouvrement composé de roches stériles tamisées afin de contrôler l'écoulement d'eau à travers la halde à stériles.

Les méthodes utilisées pour mener les essais en cuve, et en colonnes (dans une moindre mesure), sont systématiques et reproductives, ce qui permet d'étudier le comportement des roches stériles à une échelle intermédiaire. Les protocoles expérimentaux semblent valides, car les principaux résultats sont comparables à la théorie, aux méthodes de prédiction et aux simulations numériques. On note toutefois qu'aucun des essais réalisés, soit en cuve ou en colonne, n'a atteint un degré de saturation à 100% au début ou une teneur en eau résiduelle à la fin; des analyses additionnelles seront nécessaires pour bien tenir compte de ces caractéristiques afin de bien comprendre les résultats obtenus.

Les résultats des essais en cuve pourront être utilisés pour mener des simulations numériques inverses et extraire les propriétés non saturées du matériau pour divers degrés de compactage. Certains résultats obtenus sont conformes aux attentes, alors que d'autres nécessitent des analyses plus poussées pour mieux comprendre le comportement du milieu non saturé. Une meilleure compréhension de l'effet du compactage pourrait permettre de mieux contrôler l'infiltration et de la structure du matériau dans la halde.

Les résultats de cette étude pourront être utilisés dans les travaux proposés suivant :

- Analyser la distribution granulométrique des stériles selon l'approche proposée par Chapuis (2015);
- Analyser les résultats des essais avec infiltromètre dans la cuve;
- Faire des analyses inverses afin d'évaluer les propriétés non saturées du matériau;
- Faire des simulations numériques plus poussées pour évaluer le degré de compactage optimal en fonction des conditions d'écoulement recherchées dans le matériau de recouvrement;
- Refaire et a existantes des essais en petites colonnes afin d'obtenir la teneur en eau résiduelle du matériau.

CHAPITRE 7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

7.1 Conclusions

Le comportement hydrogéologique des roches stériles est variable selon la configuration des haldes et les conditions d'écoulement non saturée. La caractérisation de l'écoulement de l'eau à travers le matériau compacté est indispensable pour faire l'ingénierie d'un système de couches contrôlant les écoulements dans les haldes à stériles afin de limiter le DMA ou le DNC.

Les essais de laboratoire à l'échelle intermédiaire ont été réalisés sur des échantillons de roches stériles tamisées (0-10 mm de diamètre) provenant de la halde à stériles Petit-Pas de la mine du Lac Tio, appartenant à Rio Tinto Fer et Titane, située près de Havre St-Pierre, Québec. Le projet inclus divers essais ayant pour objectif de faire une caractérisation hydrogéotechnique complète des roches stériles tamisées à l'aide d'essais standards, d'essais en colonnes et d'essais en cuve selon un protocole développé pour évaluer l'impact du degré de compactage sur les écoulements. Des essais à l'échelle intermédiaire de laboratoire peuvent permettre de mieux comprendre les caractéristiques hydrogéologiques d'un matériau et d'obtenir suffisamment d'information pour évaluer ces propriétés à une échelle plus proche des conditions de terrain. Les paramètres étudiés incluent la distribution granulométrique, le degré de compactage, la densité relative des grains, la porosité, le volume du matériau en place, la teneur en eau massique et volumique et le degré de saturation.

Les courbes granulométriques obtenues pour la roche stérile tamisée (à 0-10 mm) montrent la taille des grains est très étalée. Selon le système unifié de classification des sols (USCS), les roches stériles tamisées seraient classifiées comme étant un sable angulaire (SW-SM) étalé (avec un coefficient d'uniformité, $C_U = 17,9$) contenant un peu de silt.

Les essais de perméabilité à charge constante et variable, en perméamètre à parois rigides et en colonnes, ont montré que la valeur de la conductivité hydraulique saturée k_{sat} varie entre 6×10^{-4} et 2×10^{-2} cm/s pour les roches stériles tamisées. Ces valeurs sont dépendante de la porosité (inversement proportionnel à l'effort de compactage) et la granulométrie de l'échantillon. Les valeurs de conductivité hydraulique saturée ont aussi été estimées à l'aide des modèle Kozeny-

Carman [KC] et Kozeny-Carman modifié [KCM] et les valeurs obtenues sont assez similaires à celles mesurées lors des essais au perméamètre et en colonnes, voir section 6.2.2.

La courbe de rétention d'eau [CRE] a été obtenue expérimentalement avec les essais en colonne et les résultats expérimentaux ont été lissés avec le modèle de van Genuchten (1980) à l'aide du logiciel RETC. Les prédictions de la CRE avec les modèles Kovacs modifié [MK] et Kovacs modifié pour stériles [MKs] produisent une bonne prédiction de l'AEV, mais un décalage se produit pour la teneur en eau résiduelle le WEV (ou ψ_r) car les essais au laboratoire n'ont pas atteint la teneur en eau résiduelle (figure 6.7). Les courbes de rétention d'eau obtenues expérimentalement montrent une pression d'entrée d'air (AEV) de entre 7,6 et 8,8 cm H₂O et une teneur en eau volumique résiduelle θ_r près de 0,08.

Les simulations numériques des essais en cuve sont utiles pour évaluer le comportement hydrogéologique du matériau sous différent degrés de compactage. Dans les essais au laboratoire, le drainage a été plus rapide que ce qui a été prédit par les modèles numériques. Ceci pourrait être dû à un drainage préférentiel, à l'hétérogénéité du matériau ou aux propriétés hydrogéologiques utilisées pour les modèles numériques en cuve qui étaient basées sur celles des stériles en colonnes.

7.2 Recommandations

En ce qui concerne des travaux futurs, il serait utile de faire :

- des essais en colonnes à différents degrés de compactage et analyser ces essais avec des simulations numériques. Ceci aidera à définir la CRE et la conductivité hydraulique saturée en fonction du degré de compactage. Une comparaison plus complète serait ainsi possible entre les essais en laboratoire et les modèles de prédiction;
- Des essais avec gel, car au Canada la majorité des ouvrages sont soumis aux cycles de gel-dégel; il pourrait y avoir variation de la porosité et des caractéristiques de l'écoulement;

- Des essais en cuve et en colonne sur d'autres roches stériles ayant des caractéristiques différentes (granulométrie, angularité, compactage);
- Une comparaison entre les essais de laboratoire et ceux de terrain;
- Une étude sur l'effet de l'hétérogénéité dû aux instruments insérés dans le matériau qui pourraient mener à des écoulements localisés;
- Des essais au laboratoire qui permettent de bien définir les propriétés hydrogéologiques saturées et résiduelles.

BIBLIOGRAPHIE

- Aachib, M., Mbonimpa, M. & Aubertin, M. (2004). Measurement and Prediction of the Oxygen Diffusion Coefficient in Unsaturated Media, with Applications to Soil Covers. *Water, Air and Soil Pollution*, 156, 163-193.
- Andersson, T. & Thurley, M.J. (2008). Visibility Classification of Rocks in Piles. *IEEE Computer Society*, 207-213.
- Anterrieu, O., Chouteau, M. & Aubertin, M. (2010). Geophysical Characterization of the Large-scale Internal Structure of a Waste Rock Pile From a Hard Rock Mine. *Bulletin of Engineering, Geology and the Environment*, 533-548.
- ASTM (2000). Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head) (D2434), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2002a). Standard Test Method for Determination of Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using a Hanging Column, Pressure extractor, Chilled Mirror hygrometer, and/or Centrifuge (D6836), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2002b). Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter (D5856), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2006). Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head) (D2434), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2007a). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (D422), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2007b). Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle Size Analysis and Determination of Soil Constants (D421) ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2007c). Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by Sand-Cone Method (D1556), ASTM International, West Conshohocken, PA.

- ASTM (2007d). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)) (D1557), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2010a). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer (D854), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2010b). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass (D2216), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2011). Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size (C702-M), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)) (D698), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Aubertin, M. (1995) Critères de stabilité pour la restauration des sites d'entreposage de rejets miniers. Colloque: Les mines de demain en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda. Ordre des Ingénieurs du Québec.
- Aubertin, M., Bussière, B., Aachib, M., Chapuis, R.P. & Crespo, J.R. (1996). Une modélisation numérique des écoulements non saturés dans des couvertures multicouches en sols. *Hydrogéologie*, 1, 3-13.
- Aubertin, M., Bussière, B. & Bernier, L. (2002). Environnement et gestion des rejets miniers. Montréal: Presse Internationales Polytechnique.CD-ROM
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B. & Chapuis, R.P. (2003). A model to Predict Water Retention Curve from Basic Geotechnical Properties. (N.R.Can., Éd.) *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 1104-1122.
- Aubertin, M., Fala, O., Molson, J., Gamache-Rochette, A., Lahmira, B., Martin, V., Lefebvre, R., Bussière, B., Chapuis, R.P., Chouteau, M. & Wilson, G.W. (2005). Évaluation du comportement hydrogéologique & géochimique des haldes à stériles. *Comptes-rendus*

- du Symposium 2005 Rouyn-Noranda sur l'Environnement & les Mines*. Rouyn-Noranda, Québec, Canada, CD-ROM
- Aubertin, M., Fala, O., Molson, J., Chouteau, M., Anterrieu, O., Hernandez, M.A., Chapuis, R.P., Bussière, B., Lahmira, B. & Lefebvre, R. (2008). Caractérisation du comportement hydrogéologique & géochimique des haldes à stériles. *Comptes-rendus du Symposium 2008 Rouyn-Noranda sur l'Environnement et les Mines*. Rouyn-Noranda, Québec, Canada, CD-ROM
- Aubertin, M., Cifuentes, E., Apithy, S.A., Bussière, B., Molson, J. et Chapuis, R. (2009). Analyses of water diversion along inclined covers with capillary barrier effects, *Canadian Geotechnical Journal*, 46 P. 1146-1164.
- Aubertin, M., Bussière, B. et Zagury, G. (2011). La gestion des rejets miniers au Québec. Dans *L'état du Québec 2011*, 225-232. Boréal.
- Aubertin, M. (2013). Recommendations for the construction of waste rock piles, GeoMontréal
- Aubertin, M., Pabst, T., Bussière, B., James, M., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M. & Maqsoud, A. (2015). Revue des meilleures pratiques de restauration des sites d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA. *Comptes-rendus du Symposium 2015 Rouyn-Noranda sur l'Environnement & les Mines*. Rouyn-Noranda, Québec, Canada, CD-ROM
- Barbour, S.L. (1998). Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: The soils-water characteristic curve: A historical perspective. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(5), 873-894.
- Bédard, C. (2003). *Étude de laboratoire des propriétés hydriques non saturées de sols sableux*. Maîtrise ès Sciences Appliquées. École Polytechnique de Montréal.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Dagenais, A.-M. & Archambault, M. (2004). Kinetic tests comparison and interpretation for prediction of the Joutel tailings acid generation potential. *Environmental Geology*, 46, 1086-1101.

- Bussière, B., Aubertin, M., Chapuis, R.P. (2003): The behavior of inclined covers used as oxygen barriers, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 40, 512-535
- Bussière, B., Aubertin M., Mbonimpa, M. Molson, J.W. & Chapuis, R.P. (2007). Field experimental cells to evaluate the hydrogeological behaviour of oxygen barriers made of silty materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 44, 245-265.
- Bussière, B., Demers, I., Dawood, I., Plante, B., Aubertin, M., Peregoeva, A., Pépin, G., Lessard, G., Intissar, R., Benzaazoua, M., Molson, J.W., Chouteau, M., Zagury, G.J., Monzon, M. & Laflamme, D. (2011). Comportement géochimique & hydrogéologique des stériles de la mine Lac Tio. *Comptes-rendus du Symposium 2011 sur l'Environnement et les Mines*. Rouyn-Noranda, Québec, Canada, CD-ROM
- Campbell Scientific, I. (2009a). 229 Heat Dissipation Matric Water Potential Sensor.
- Campbell Scientific, I. (2009b). TDR Probes CS605, CS610, CS630, CS635, CS640, CS645.
- Chapuis, R.P. & al. (1989). Granular Soils in Rigid-Wall Permeameters : Method for Determining the Degree of Saturation. *Canadian Geotechnical Journal*, 26, 71-79
- Chapuis, R.P. & Légaré, P.P. (1992). A Simple Method for Determining the Surface Area of Fine Aggregates and Fillers in Bituminous Mixtures. In *Effects of Aggregates and Mineral Filler on Asphalt Mixture Performance*. American Society for Testing and Materials (ASTM), Special Technical Publication (STP), 1147, 177-186
- Chapuis, R.P., Chenaf, D., Bussière, B., Aubertin, M. & Crespo, R. (2001). A User's Approach to Assess Numerical Codes for Saturated and Unsaturated Seepage Conditions. (N. R. Canada, Éd.) *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 1113-1126.
- Chapuis, R.P. & Aubertin, A. (2003): On the Use of the Kozeny-Carman Equation to Predict the Hydraulic Conductivity of Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 616-628
- Chapuis, R.P., Masse, I., Madinier, B. & Aubertin, M. (2006a). Essai de drainage en colonne pour obtenir les propriétés non saturées de matériaux grossiers. *Comptes-rendus de la Conférence de Sea to sky Geotechnique 2006*. Vancouver, Colombie-Britannique, Canada, CD-ROM

- Chapuis, R.P., Masse, I., Madinier, B. & Aubertin, M. (2006b). A drainage Column Test for Determining Unsaturated Properties of Coarse Materials. *Geotechnical Testing Journal*, 30 (2)
- Chapuis, R.P. (2012). Predicting the Saturated Hydraulic Conductivity of Soils: A Review, *Bulletin Engineering Geology Environment*, 71, 401-434, Springer. DOI 10.1007/S10064-012-0418-7
- Dane, J.H. & Topp, G.C. (2002). *Methods of Soil Analysis, Part 4 - Physical Methods*. Soil Science Society of America, Book Series V
- Dawood, I., Aubertin, M., Intissar, R. & Chouteau, M. (2011). A combined Hydrogeological-Geophysical Approach to Evaluate the Unsaturated Flow in a Large Waste Rock Pile. *Pan-Am CGS Geotechnical Conference*. Toronto, Ontario, Canada.
- Dawood, I. & Aubertin, M. (2012). Influence of Internal Layers on Water Flow Inside a Large Waste Rock Pile. *École Polytechnique de Montréal*.
- Decagon devices, I. (2012). Soil moisture sensors. Récupéré sur <http://www.decagon.com/products/sensors/soil-moisture-sensors/>
- Decagon Devices, I. (2015). Measurement volume of Decagon Volumetric water content sensors, par Doug Cobos.
- Demers, I., Bussière, B., Benzaazoua, M., Mbonimpa, M. & Blier, A. (2008). Column Test Investigation on the Performance of Monolayer Covers Made of Desulphurized Tailings to Prevent Acid Mine Drainage. *Minerals Engineering*, 21, 317-329.
- Éthier, M.-P. (2011). Évaluation du comportement géochimique en conditions normale et froides de différents stériles présents sur le site de la mine Raglan. *Maîtrise ès sciences appliquées: École Polytechnique de Montréal*.
- Fala, O., Aubertin, M., Molson, J., Bussière, B., Wilson, G.W., Chapuis, R.P. & Martin, V. (2003). Numerical Modelling of Unsaturated Flow in Uniform and Heterogeneous Waste Rock Piles. Cairns, Queensland: 6th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD). Cairns, Queensland, Australie.

- Fala, O., Molson, J., Aubertin, M., Bussière, B. & Chapuis, R.P. (2006). Numerical Simulations of Long Term Unsaturated Flow and Acid Mine Drainage of Waste Rock Piles. American Society of Mining and Reclamation: 7th International Conference on Acid Rock Drainage, 582-597. St. Louis, MO, United States.
- Fala, O. (2008). Analyses des conditions d'écoulement non saturé dans les haldes à stériles. Thèse de doctorat en génie minéral. École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada
- Fala, O., Molson, J., Dawood, I., Aubertin, M., Bussière, B., Chapuis, R.P. (2011). Simulating Water Flow and Reactive Transport in Waste Rock Piles Using Stochastic Properties. Rapport technique 2011-03: École Polytechnique de Montréal.
- Fetter, C.W. (2001). Applied Hydrogeology: 4th Edition, Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey, United States.
- Fredlund, M.D. (2000). The Role of Unsaturated Soil Property Functions in the Practice of Unsaturated Soil Mechanics, PhD Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, Canada.
- Fredlund, D.G. (2002). Use of the Soil-Water Characteristic Curve in the Implementation of Unsaturated Soil Mechanics. Proceedings of the Third International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002, Recife, Brazil, 3, 887-902.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H. & Fredlund, M.D. (2012). Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons Inc. p. 926.
- Gamache-Rochette, A., (2004). Une étude de caractérisation en laboratoire et sur le terrain des écoulements de l'eau dans les roches stériles, Mémoire ès sciences appliquées, Université de Montréal: École Polytechnique de Montréal.
- Google. (2012). Google Earth. Consulté le 04 28, 2012, sur <http://maps.google.com/maps?ll=50.551527,-63.400545&z=14&t=h&hl=fr>
- Harr, M. (1962). Groundwater and Seepage. New York: McGraw-Hill Book Company.

- Hernandez, A. M. (2007): Une étude expérimentale des propriétés hydriques des roches stériles et autres matériaux à granulométrie étalée. Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal, Juillet 2007
- Hillel, D. (1998). Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications and Environmental Considerations. Academic Press.
- Hunt, R. (1984). Geotechnical Engineering Investigation Manual. New York, USA: McGraw-Hill Book Company.
- Intissar, R. (2009). Apport des méthodes électriques à la détermination de la structure interne d'une halde à stériles, Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal, Juin 2009.
- Institut du nouveau monde (2010). État du Québec 2010, Éditions Boréal, p. 247.
- Irmay, S. (1954). On the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Transactions of American Geophysical Union, Vol. 35, pp. 463-468.
- Jambor, J.L., Blowes, D.W. (1994). Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Waste (éd. Special, Vol. 22). Mineralogical Association of Canada.
- Kalinski, M. (2006). Soil mechanics lab manual, John Wiley and Sons, p.77
- Klein, C., Hurlbut, C.S.Jr., (1937). Manual of mineralogy, John Wiley & Sons Inc., Revised 21st Edition (after James D. Dana)
- Krumbein, W.C. & Sloss, L.L. (1963). Stratigraphy and Sedimentation - Second edition, department of geology, Northwestern University, p.111
- Lessard, G. (2011). Essais d'infiltration sur la halde à stériles Petit-pas de la mine Tio, Havre-St-Pierre. Maîtrise ès Sciences Appliquées: École Polytechnique de Montréal.
- McCarter, M.K. (1985). Stability monitoring. Design of Non-Impounding Mine Waste Dumps. Society of Mining Engineers of AIME, New York. 161-173
- Maqsoud, A., Bussière, B., Aubertin, M. & Mbonimpa, M. (2006). Modification of the Predictive MK Model to Integrate Hysteresis of the Water Retention Curve.

- Maqsoud, A., Bussière, B., Mbonimpa, M. & Aubertin, M. (2007). Conversion of the modified Kovacs model parameters to the Brooks & Corey and van Genuchten model parameters for granular soils. Ottawa: Ottawa Geo.
- Martin, V., Aubertin, M., Zhan, G., Bussière, B. & Chapuis, R.P. (2005). Investigation Into the Hydrological Behavior of Exposed and Covered Waste Rock Dumps. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 318, 139-146.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Chapuis, R.P. & Bussière, B. (2002). Practical Pedotransfer Functions for Estimating the Saturated Hydraulic Conductivity. (K. A. Publishers, Éd.) Geotechnical and Geological Engineering, 20, pp. 235-259.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M. & Bussière, B. (2006). Predicting the Unsaturated Hydraulic Conductivity of Granular Soils from Basic Geotechnical Properties Using the Modified Kovacs (MK) Model and Statistical Models. Canadian Geotechnical Journal, 43, 773-787.
- MDDEP, (Avril 2005). Directive 019 sur l'industrie minière. Ministère du Développement durable, de l'Environnement, et des Parcs.
- MEND (2004). Design, construction and performance monitoring of cover system for waste rock and tailings, Report 2.21.4.
- Molson, J.W., Frind, E.O., Aubertin, M. & Blowes, D. (2004). POLYMIN: A Reactive Mass Transport and Sulphide Oxidation Model, User Guide. Montréal: École Polytechnique.
- Molson, J.W., Fala, O., Aubertin, M. & Bussière, B. (2005). Numerical Simulations of Pyrite Oxidation and Acid Mine Drainage in Unsaturated Waste Rock Piles. Journal of Contaminant Hydrology, 78, 343-371.
- Morin, K.A., Gerencher, E., Jones, C.E. & Konasewich, D.E. (1991). Critical Literature Review of Acid Drainage from Waste Rock, MEND project 1.11.1
- Morin, K.A. & Hutt, N.M. (1997). Environmental Geochemistry of Mine Site Drainage: Practical Theory and Case Studies. MDAG Publishing.
- Mualem, Y. (1976). A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. Water Resources Research, 12, 513-522

- Pabst, T., Molson, J., Aubertin, M. & Bussière, B. (2011). Physical and Geochemical Transport Modelling of Pre-oxidized Acid-generating Tailings With a Monolayer Cover., Proceedings of Mine Closure, 323-332.
- Pépin, G. (2009). Évaluation du comportement géochimique de stériles potentiellement générateurs de drainage neutre contaminé à l'aide de cellules expérimentales in situ. Mémoire de maîtrise. École Polytechnique de Montréal, Université du Québec en Abitibi Témiscamingue, Canada.
- Plante, B., Benzaazoua, M. & Bussière, B. (2011). Kinetic Testing and Sorption Studies by Modified Weathering Cells to Characterize the Potential to Generate Contaminated Neutral Drainage. Mine Water Environment, 30, 22-37.
- Peregoedova, A. (2012). Étude expérimentale des propriétés hydrogéologiques des roches stériles à une échelle intermédiaire de laboratoire, Mémoire maîtrise ès sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal, Octobre 2012.
- Peregoedova, A. et al., (2013). Laboratory measurement and prediction of the saturated hydraulic conductivity of mine waste rock, GeoMontréal 2013
- Rahardjo, H. & Leong, E.C. (2006): Suction Measurements, Unsaturated soils 2006, ASCE, 81-104
- Rahardjo, H. et al. (2014): Comprehensive Instrumentation for Real Time Monitoring of Flux Boundary Conditions in Slope, Procedia Earth and Planetary Science, 9, p. 23-43
- Richards, L., (1931). Capillary Conduction of Liquids Through Porous Mediums. J. Physics, Issue 1, 318-333.
- RTFT, (2009). Rapport Développement Durable 2009. Rio Tinto Fer et Titane. Consulté le 11 28, 2011, sur http://www.rtft.com/FRC/media/sustainable_development_reports.asp
- RTFT, (2010). Rapport Développement Durable 2010 - 60 ans d'histoire 1950-2010. Rio Tinto Fer et Titane. Consulté le 11 28, 2011, sur http://www.rtft.com/FRC/media/sustainable_development_reports.asp.
- Schlumberger (2011). Specifications Micro-Diver, Schlumberger water services, 2011.

- Fahmy M., (2010). Un sol riche en minerais. Dans Institut du nouveau monde, Boréal (Édit.) *L'état du Québec 2010* (p. 473). Québec, Province, Canada : Boréal.
- van Genuchten, M. Th. (1980). A Closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- Villeneuve, M., Bussière, B. & Benzaazoua, M. (2009). Assessment of Interpretation Methods for Kinetic Tests Performed on Tailings Having a Low Acid Generating Potential. Skellefteå, Sweden: 8th ICARD.
- Zhan, G., Mayer, A.B., McMullen, J. & Aubertin, M. (2001). *Slope Effect Study on Capillary Cover Design for Leach Pad Closure. Presented at the SME annual meeting, February 26-28, 2001. Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., Denver, Colorado, United States*, 310, 104-110.

ANNEXE A – RÉSULTATS DES ESSAIS EN CUVE

A.

Tableau A.1 : Compilation des données des essais en cuve

Cuve 1-faible compaction					Sondes	
	Teneur en eau massique moyenne	Poids unitaire sec moyen	Porosité moyenne	Saturation moyenne	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique moyenne
	w_{moy} %	$\gamma_{\text{d-moy}}$ kN/m ³	n -moy	S-moy	Θ -moy m ³ /m ³	Θ -moy m ³ /m ³
3 ^{ième} (surface)	6,37%	17,5	0,35	0,33	0,11	0,14
2 ^{ième} (milieu)	6,60%	18,0	0,33	0,37	0,12	0,11
1 ^{ière} (fond)	9,73%	17,5	0,35	0,54	0,19	0,15
<hr/>						
Cuve 2-moyenne compaction						
3 ^{ième} (surface)	5,03%	18,8	0,30	0,33	0,10	0,11
2 ^{ième} (milieu)	5,19%	18,3	0,32	0,31	0,10	0,10
1 ^{ière} (fond)	5,90%	17,3	0,35	0,29	0,10	0,10
<hr/>						
Cuve 3-forte compaction						
3 ^{ième} (surface)	0,99%	19,1	0,29	0,08	0,02	0,06
2 ^{ième} (milieu)	1,98%	20,8	0,23	0,30	0,04	0,07
1 ^{ière} (fond)	2,11%	20,5	0,23	0,26	0,04	0,07

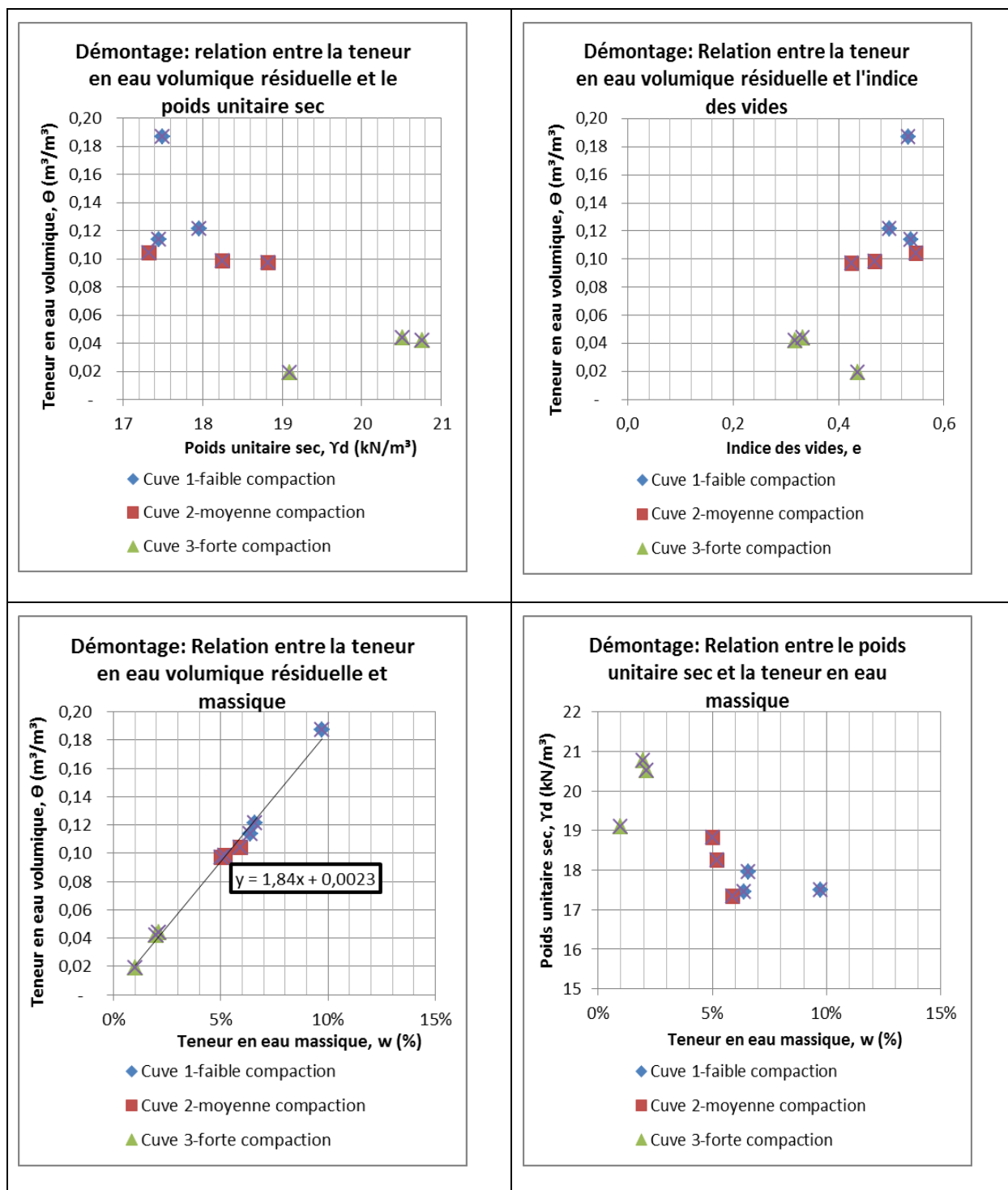


Figure A.1 : Graphiques des résultats des essais en cuve au démontage

Montage 1 – faible compaction

Les particularités du premier montage :

- Faible compaction – hauteur de tombée du disque de 3cm pour chacune des couches de sol. Un changement approximatif de la hauteur de chacune des couches avec la compaction de 1 cm.
- Tous les fils des sondes ont été rassemblés du côté ouest de la cuve (à l’opposé de la sortie d’exfiltration), ce qui est causé une zone moins compactée où il y a des chemins préférentiels pour l’eau.
- Les premiers essais ont été suivis de plusieurs façons jusqu’à la ‘bonne’ méthode soit trouvée.
- Infiltromètre enfoncé dans le sol à 7,6cm de profondeur

Caractérisation au montage et démontage

Plusieurs vérifications ont été faites pour valider les mesures au cône de sable, mais il semble y avoir des problèmes avec ce test.

Tableau A.2 : Résultat des données au montage et au démontage M1

	Montage M1 - en fonction des échantillons prélevés	Démontage M1 - En fonction des poids et teneurs en eau	Démontage M1 - En fonction des résultats du cône de sable
Poids total sec, W_s (kg)		342,34	
Volume humide, V_T (cm ³)	211 799	192 385	195 138
Densité sèche, ρ_d (kg/m ³)		1 779,4	1 848,9
Densité humide, ρ_m (kg/m ³)		1 836,2	1 975,7
Poids unitaire sec, γ_d (kN/m ³)		17,45	18,05
Teneur en eau massique moyenne, w (%)	6,1%	7,6%	7,4%
Indice des vides, e		0,54	0,50
Porosité, n		0,35	0,33
Saturation, S (%)		40%	45%
Teneur en eau volumique, θ (m ³ /m ³)		0,14	0,14
Affaissement moyen entre montage et démontage (cm)	S.O.	2,9	S.O.
Poids total sec des particules fines récupérés dans l'eau (g)		33,1	
Hauteur de tombé du disque de compaction (cm)	3		

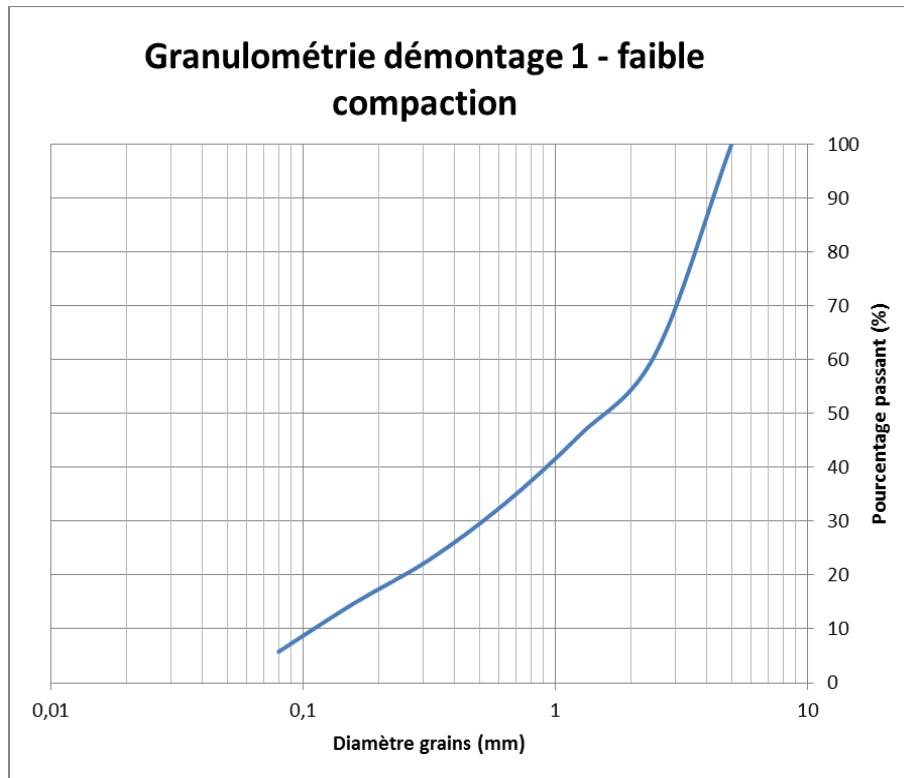


Figure A.2 : Distribution granulométrique au démontage de la cuve M1

M1E1-infiltration par anneau au centre

- L'infiltration a été suivie par une sonde dans la colonne, une burette attachée à la colonne et une pesée qui était suivie au moyen de photos à toutes les minutes.
- La charge dans l'infiltromètre était suivie à l'oeil avec une ligne sur le bord de l'infiltromètre à 3 cm
- l'exfiltration a été suivie aux minutes avec des récipients d'eau qui étaient pesés aux minutes. Le point de sortie de l'exfiltration était trop bas et la manipulation n'a pas été délicate donc il y a eu beaucoup d'eau perdu.
- Aucune sonde à pression n'a enregistré la pression atmosphérique pendant l'essai.
- L'exfiltration a débuté à 20m20s.
- L'infiltration a duré 1h20. Il y a eu un écoulement à l'exfiltration pendant 6h après l'arrêt de l'infiltration.
- Une cellule Mariotte remplie d'eau a été nécessaire pour compléter l'essai.

Vitesses

- Infiltration selon colonne: sonde=-0.0191cm/s, poids=-0.0198cm/s

- exfiltration au début: 0.0136cm/s, fin= 0.0006cm/s

Résultats avec les sondes diélectriques

Essai M1E1

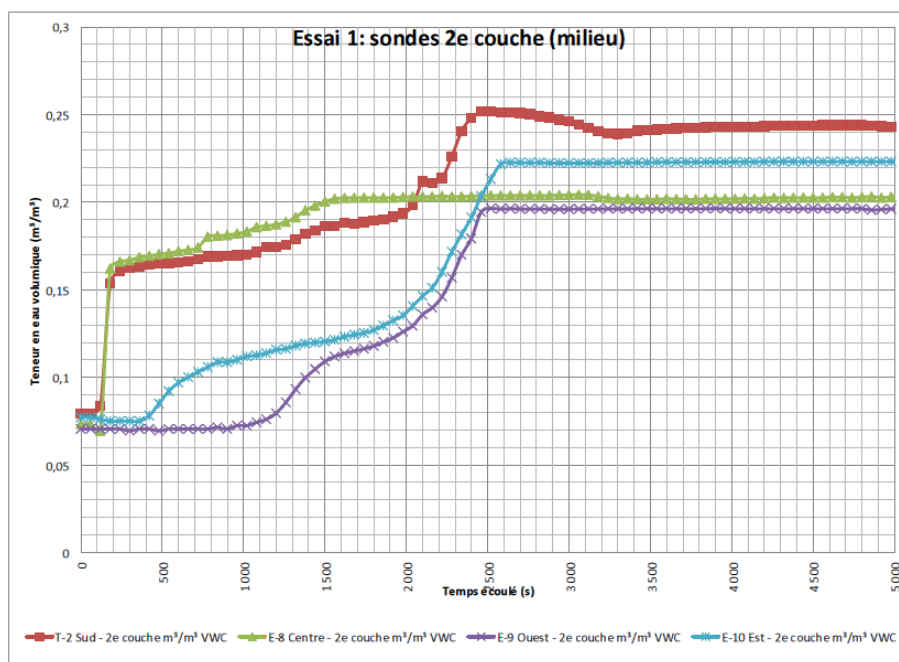


Figure A.3 : Résultats des sondes diélectriques couche du milieu M1E1

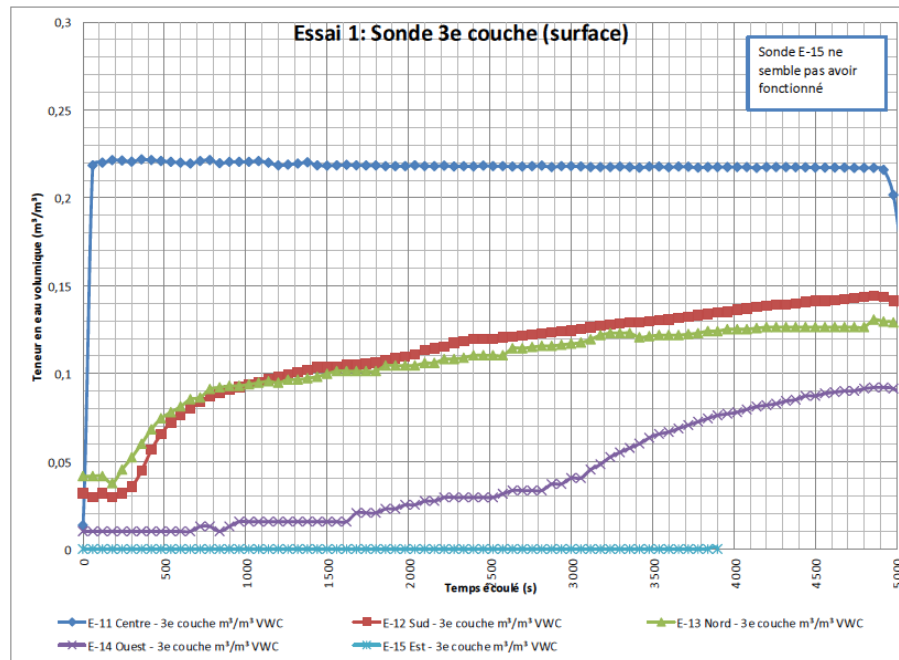


Figure A.4 : Résultats des sondes diélectriques couche de surface M1E1

Essai M1E2-cuve remplie

Essai saturée avec charge d'environ 15-20cm d'eau sur toute la cuve. La saturation s'est faite par le bas de la cuve jusqu'à ce que la surface soit humide, et ensuite de l'eau a aussi été ajoutée à partir de la surface pour accélérer le processus.

L'infiltration a été suivie par 5 sondes à pression à la surface du sol dans la cuve.

L'exfiltration a été suivi par le poids seulement. La balance électronique (connecté à l'ordinateur) a été mise directement sous la sortie de l'exfiltration avec une cuve pour collecter l'eau. Les lectures par l'ordinateur se sont faites en continue à toutes les 10 secondes. Au changement de chaque récipient utilisé pour collecter l'eau il faut ajuster les données pour le nouveau poids du récipient.

- Aucune sonde à pression n'a enregistré la pression atmosphérique pendant l'essai.
- L'exfiltration a débuté à 0s.
- L'infiltration a duré 1h10. Il y a eu un écoulement à l'exfiltration pendant 5h après l'arrêt de l'infiltration.
- Une cellule Mariotte remplie d'eau a été nécessaire pour compléter l'essai.

Vitesses

- Sonde Centre B9114 vitesse -0.0031cm/s
- Sonde nord H1162 vitesse -0.0032cm/s
- Sonde ouest B9040 vitesse -0.0033cm/s
- Sonde est F5508 vitesse -0.0034cm/s
- Sonde sud B9016 Vitesse -0.0033cm/s
- Exfiltration vitesse 0,0031 cm/s

Essai M1E3 – infiltration par anneau au centre de la cuve

- l'infiltration a été suivie par 2 sondes dans la cellule Mariotte et une sonde au centre de l'anneau d'infiltration.
- L'exfiltration a été suivi sur la balance électronique qui suit les poids aux 10 secondes.
 - L'eau d'exfiltration a été transférée du point d'exfiltration au baril par une pompe, donc il y a un délai d'environ 1-2 secondes.
 - La valve au bas de la cuve était fermée au début de l'essai (par erreur) et elle a été ouverte après 8 minutes.
- Aucune sonde à pression n'a enregistré la pression atmosphérique pendant l'essai.
- L'infiltration a duré 1h20. Il y a eu un écoulement à l'exfiltration pendant 5h après l'arrêt de l'infiltration.
- Une cellule Mariotte remplie d'eau a été nécessaire pour compléter l'essai.

Une sonde (F5508) a aussi été placée dans le baril de collecte de l'exfiltration placé sur la balance, mais puisque le baril était vide c'est seulement lorsque l'eau a recouvert la sonde que les données seront valables. Pour le prochain essai il est recommandé de mettre de l'eau qui recouvre la sonde avant de débiter l'essai.

Vitesses

- Exfiltration baril (sonde): Début:0.0025cm/s, fin: 0.0006cm/s
- Exfiltration poids (balance): Début:0.0026cm/s, fin:0.0007cm/s
- Colonnes - infiltration: -0.01cm/s et -0.0099cm/s

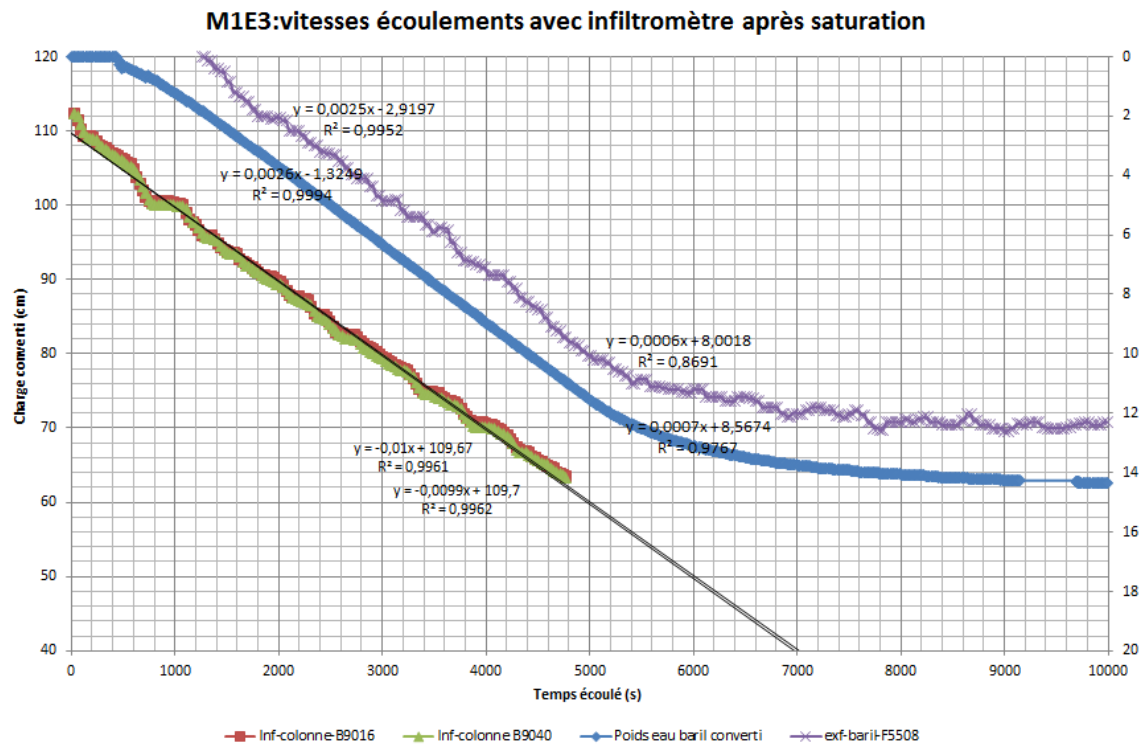


Figure A.5 : Vitesse des écoulements avec infiltromètre essai M1E3

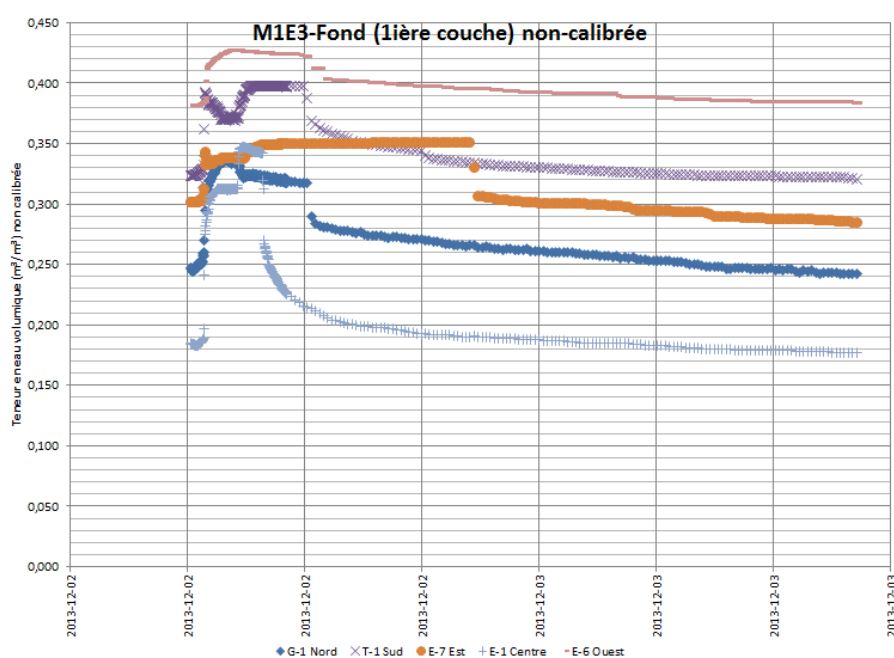


Figure A.6 : Résultats des sondes diélectriques couche du fond M1E3

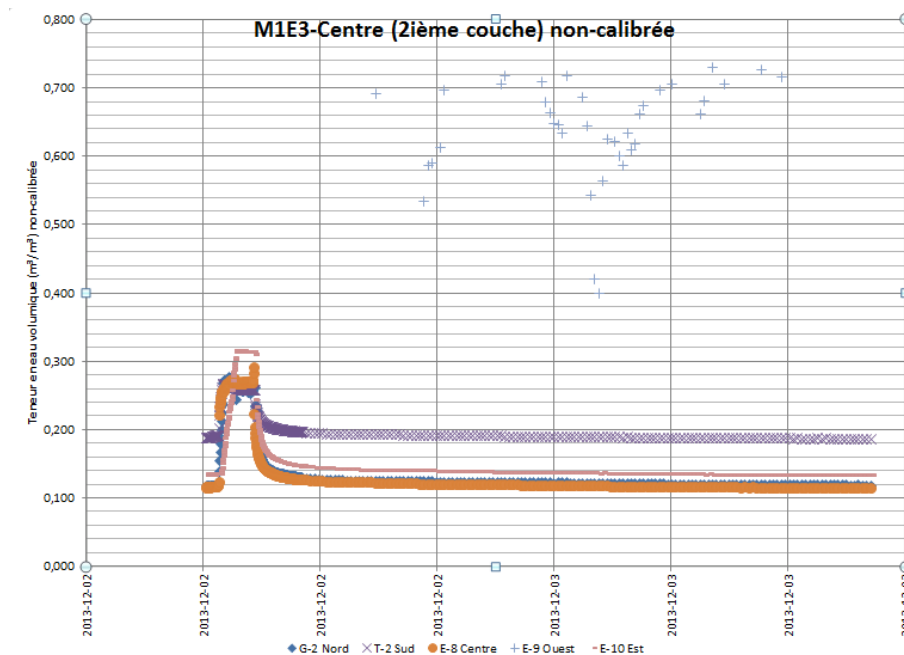


Figure A.7 : Résultats des sondes diélectriques couche du milieu M1E3

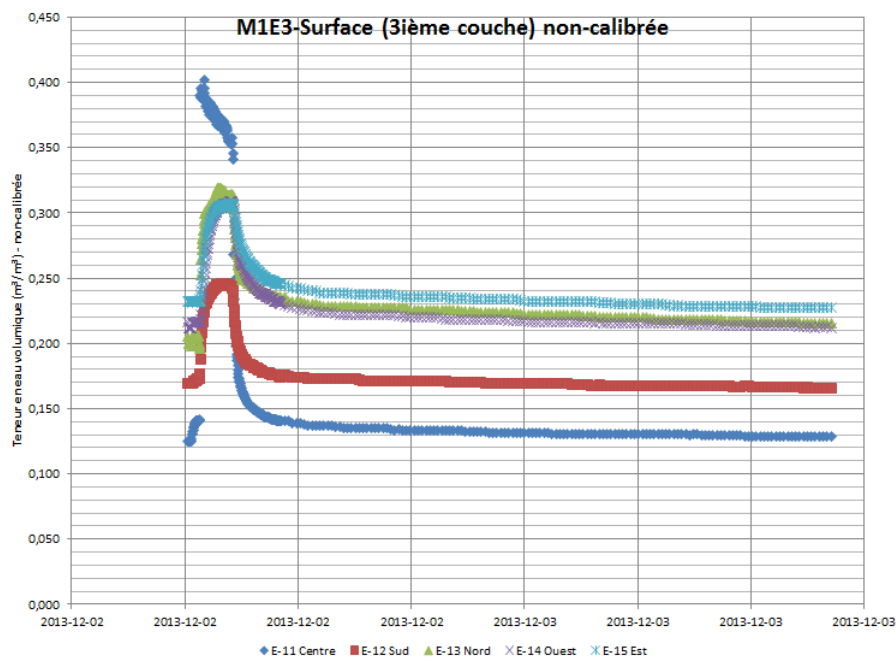


Figure A.8 : Résultats des sondes diélectriques couche de surface M1E3

M1E4 – répétition M1E3 – infiltration par l’anneau au centre de la cuve

- Répétition de l'essai M1E3 parce que la valve au bas de la cuve n'était pas ouverte au début de l'essai, donc nous ne connaissons pas le temps écoulé entre le début de l'infiltration et le début de l'exfiltration.
- l'infiltration a été suivie par 2 sondes dans la cellule Mariotte (B9016 et B9040) et une sonde au centre de l'anneau d'infiltration (B9114).
- L'exfiltration a été suivi sur la balance électronique qui suit les poids aux 10 secondes.
- L'eau d'exfiltration a été transférée du point d'exfiltration au baril par une pompe, donc il y a un délai d'environ 1-2 secondes.
- La valve au bas de la cuve était ouverte au début de l'essai.
- Une sonde (F5508) a aussi été placée dans le baril de collecte de l'exfiltration placé sur la balance, le baril contenait de l'eau jusqu'au-dessus de la sonde pour assurer une lecture des données dès le début de l'exfiltration.
- Aucune sonde à pression n’a enregistré la pression atmosphérique pendant l’essai.
- L’exfiltration a débuté à 6m10s.
- L’infiltration a durée 1h00. Il y a eu un écoulement à l’exfiltration pendant 6h après l’arrêt de l’infiltration.
- Une cellule Mariotte rempli d’eau a été nécessaire pour compléter l’essai.

Vitesses

- Exfiltration baril (sonde): Début:0.0021cm/s, fin: 0.0001cm/s
- Exfiltration poids (balance): Début:0.0022cm/s, fin:0.0001cm/s
- infiltration colonnes: -0.0092cm/s et -0.0091cm/s

Résultats des infiltrations et exfiltration mesurées

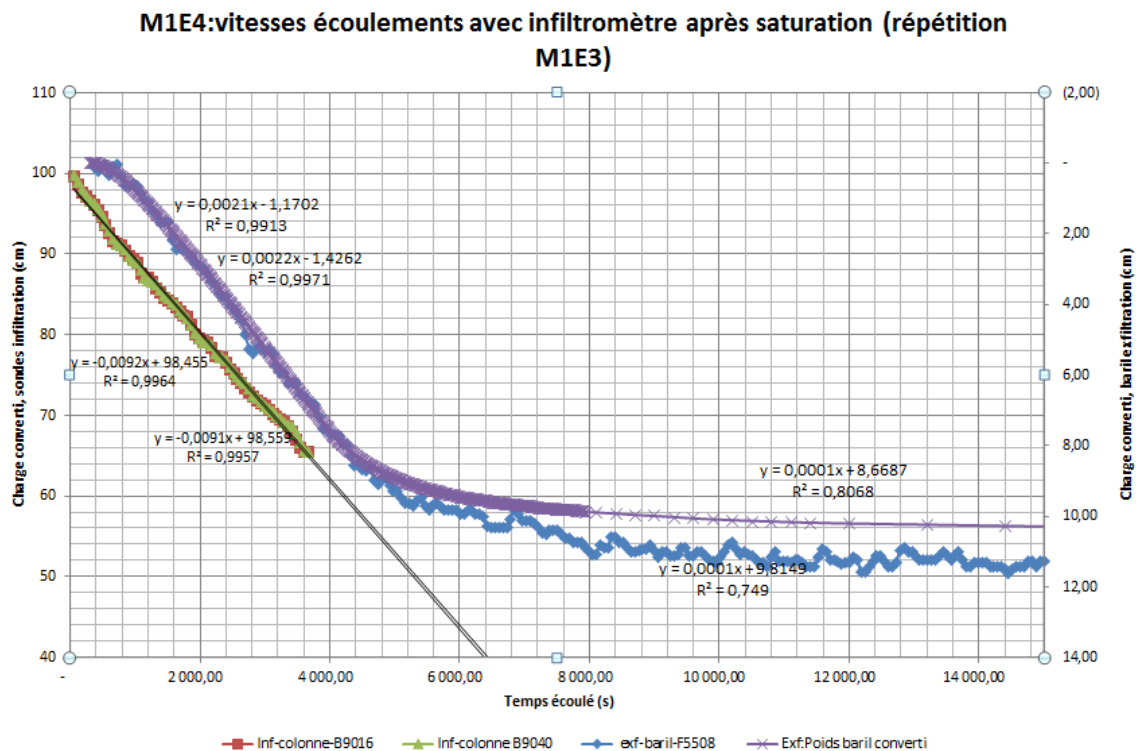


Figure A.9 : Vitesse des écoulements avec infiltromètre M1E4

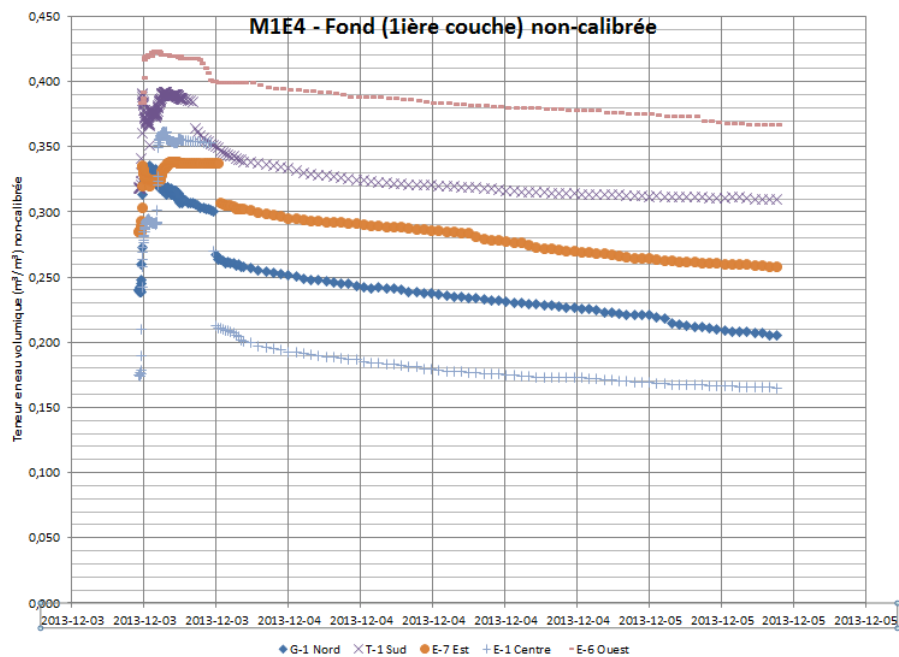


Figure A.10 : Résultats des sondes diélectriques couche du fond M1E4

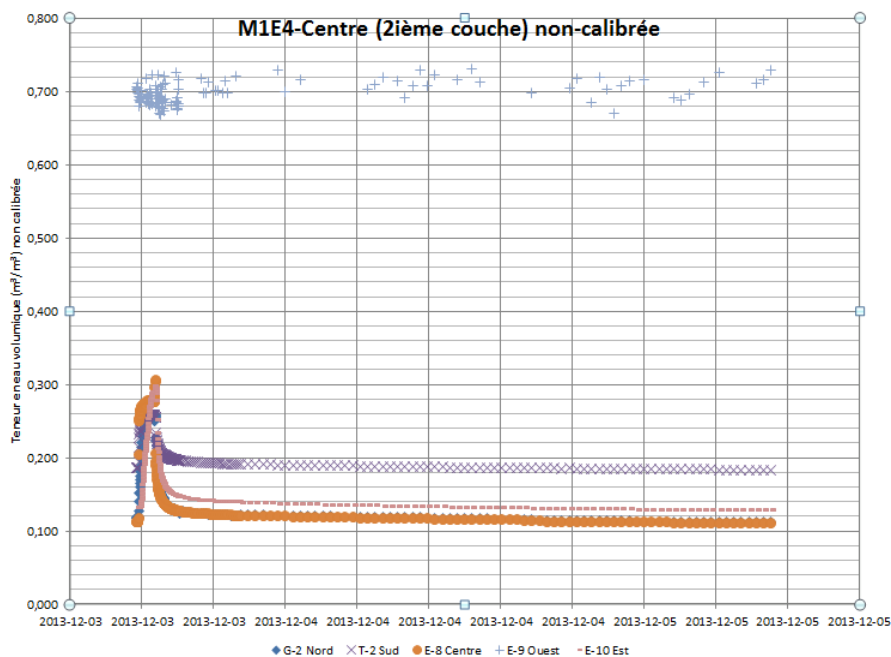


Figure A.11 : Résultats des sondes diélectriques couche du milieu M1E4

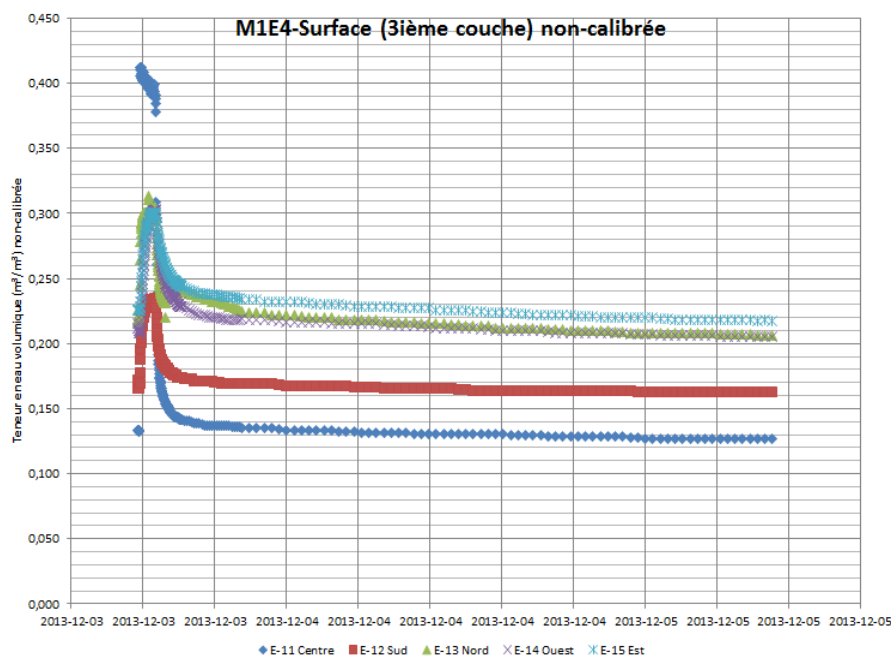


Figure A.12 : Résultats des sondes diélectriques couche de surface M1E4

Montage 2 – Compaction moyenne

Compaction avec hauteur de tombé du disque de 15cm pour chacun des couches de sol.
Changement de hauteur du sol moyen avec compaction de 0,75 cm.

Caractérisation au montage et démontage

Les valeurs obtenues avec le cône de sable ne sont pas cohérentes, donc seulement la caractérisation en relation avec le volume total de stériles dans la cuve est présentée ici.

Tableau A.3 : Résultat des données au montage et au démontage M2

	Montage cuve M2	Démontage cuve M2 - En fonction des poids et teneurs en eau	Démontage cuve M2 - En fonction des résultats du cône de sable
Poids total sec, W_s (kg)	346,18	342,10	
Volume humide, V_T (cm ³)	202 791	194 238	189 465
Densité sèche, ρ_d (kg/m ³)	1 707,1	1 761,3	1 827,2
Densité humide, ρ_m (kg/m ³)	1 786,6	1 882,8	1 930,5
Poids unitaire sec, γ_d (kN/m ³)	16,74	17,27	17,92
Teneur en eau massique moyenne, w (%)	4,7%	5,4%	5,5%
Indice des vides, e	0,61	0,48	0,50
Porosité, n	0,38	0,32	0,33
Saturation, S (%)	21%	30%	31%
Teneur en eau volumique, θ	0,08	0,10	0,10
Affaissement moyen entre montage et démontage (cm)	S.O.	1,5	S.O.
Poids total sec des particules fines récupérés dans l'eau (g)		143,6	
Hauteur de tombé du disque de compaction (cm)	15		

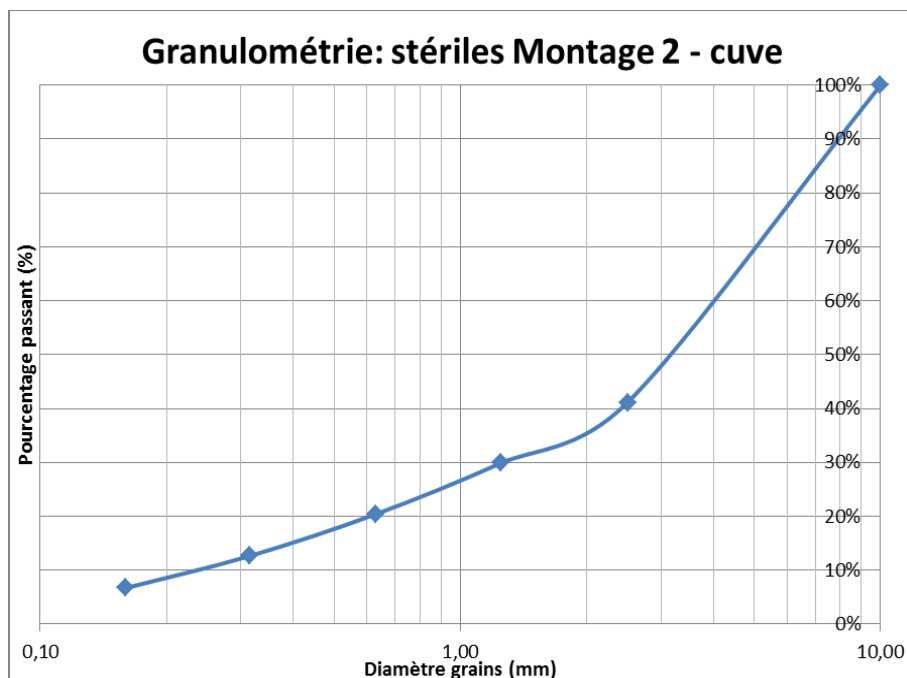


Figure A.13 : Distribution granulométrique des roches stériles au montage M2

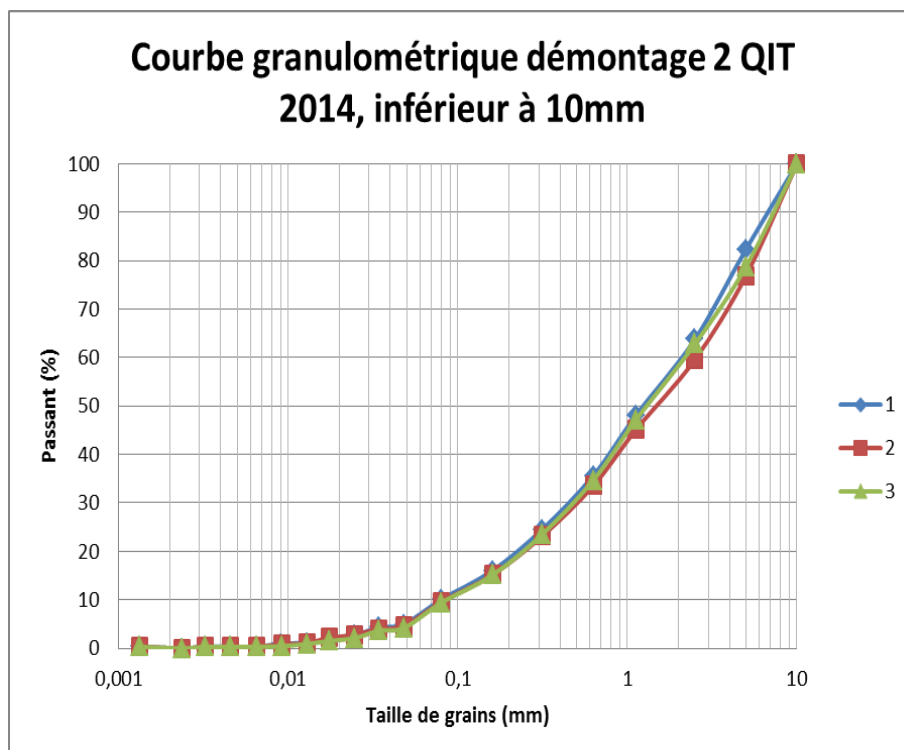


Figure A.14 : Distribution granulométrique des roches stérile au démontage M2

Essai M2E1 – Infiltration par l’anneau au centre de la cuve

- Un bouchon a été mis au bas du baril d'exfiltration pour éviter de perdre de l'eau pendant l'essai.
- Neigeux dehors - vérifier pression atmosphérique.

Baromètre

Lors des essais précédents il n’avait pas été reconnu nécessaire d’avoir une sonde à pression pour mesurer la pression atmosphérique pendant l’essai. En ayant la pression atmosphérique d’une sonde et en calibrant celle-ci avec les autres sondes il est possible d’enlever la pression atmosphérique des résultats et d’obtenir les hauteurs d’eau réelles mesurées. Pour plusieurs essais il n’y a pas eu de sonde laissé à découvert en tant que baromètre, donc seulement une portion des valeurs a pu être utilisée. Les autres valeurs ont été extrapolées à partir des données obtenues sur le site d’Environnement Canada (voir exemple graphique suivant).

Toutes les données de vitesse d’infiltration et d’exfiltration analysées pour le montage 1 seront recalculées en utilisant cette méthode. Lorsqu’une sonde baromètre aura été utilisée (montage 3), les valeurs du baromètre seront déduite de chacune des autres sondes en utilisant la calibration (voir exemple plus bas).

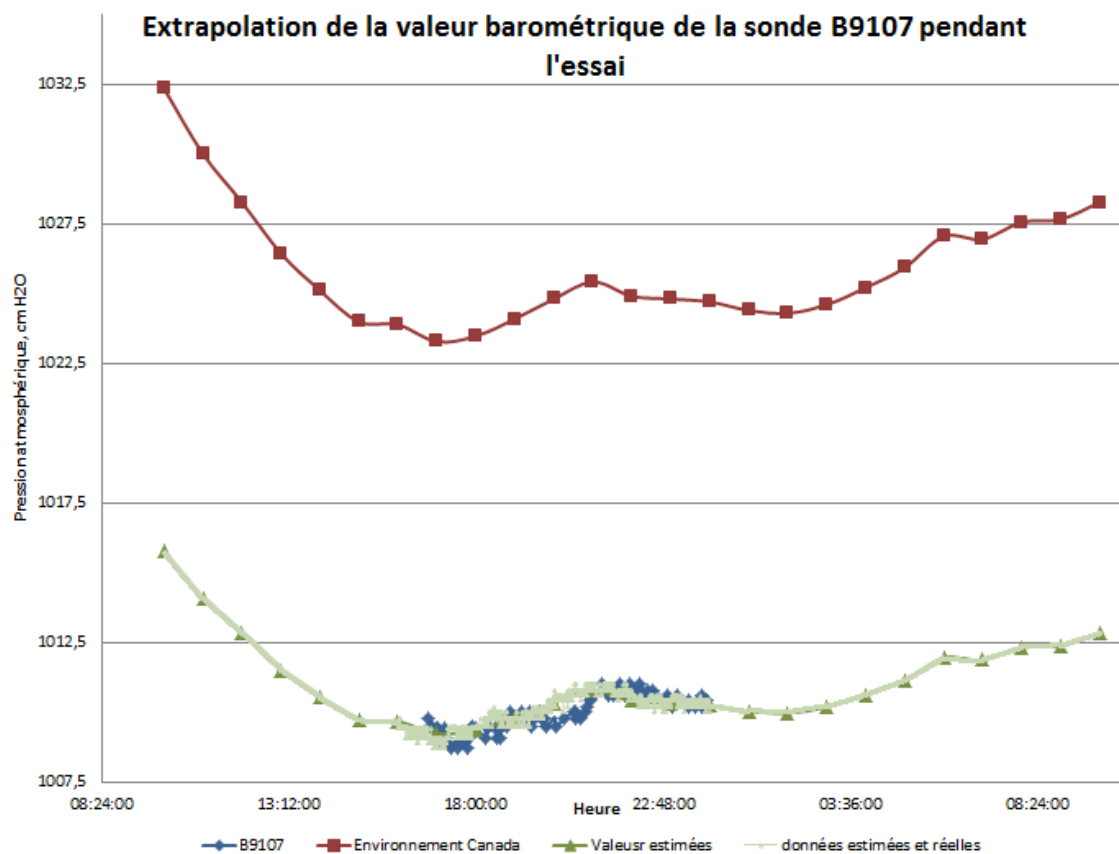


Figure A.15 : Exemple de l'extrapolation de la valeur barométrique

Calibration des sondes à pression

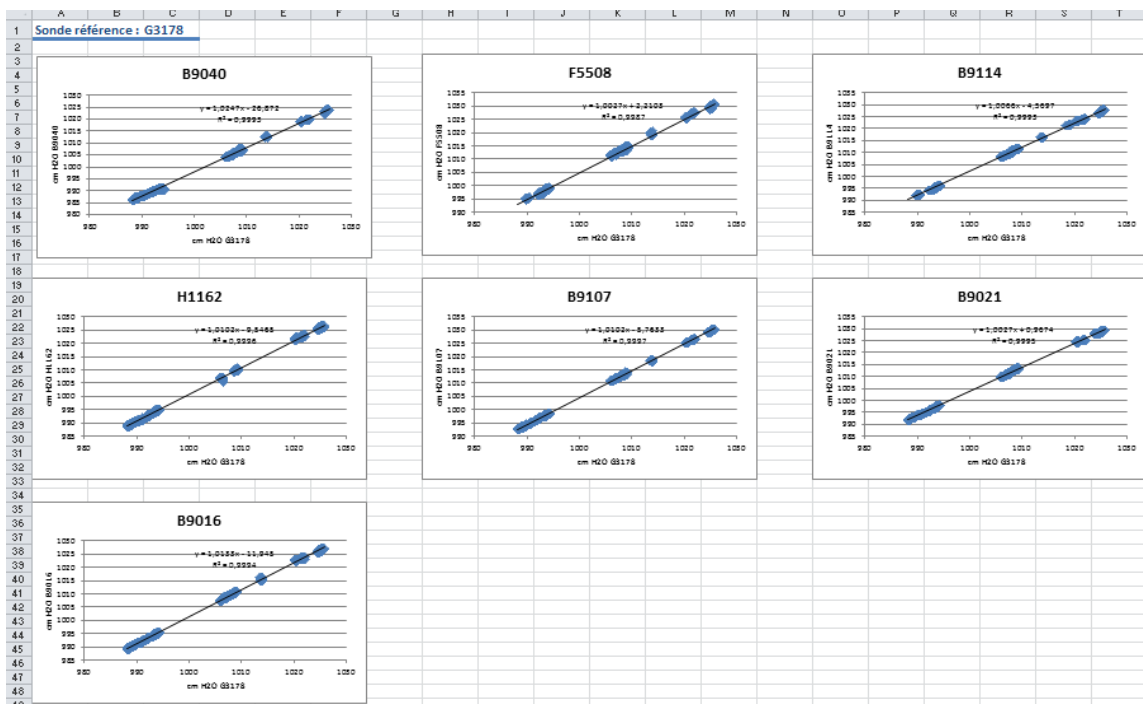


Figure A.16 : Exemple de calibration des sondes à pression avec relation linéaire

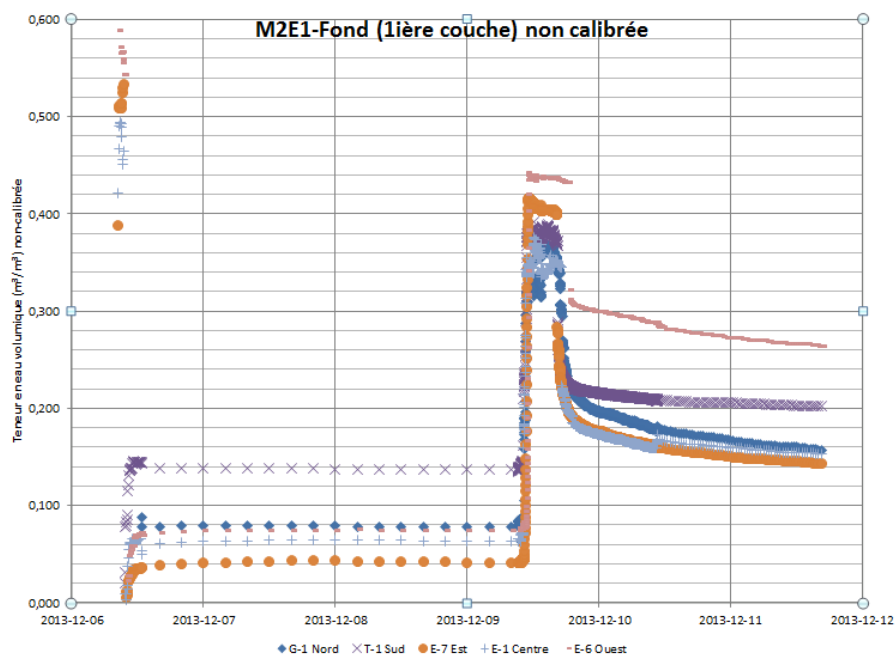


Figure A.17 : Résultats des sondes diélectriques couche du fond M2E1

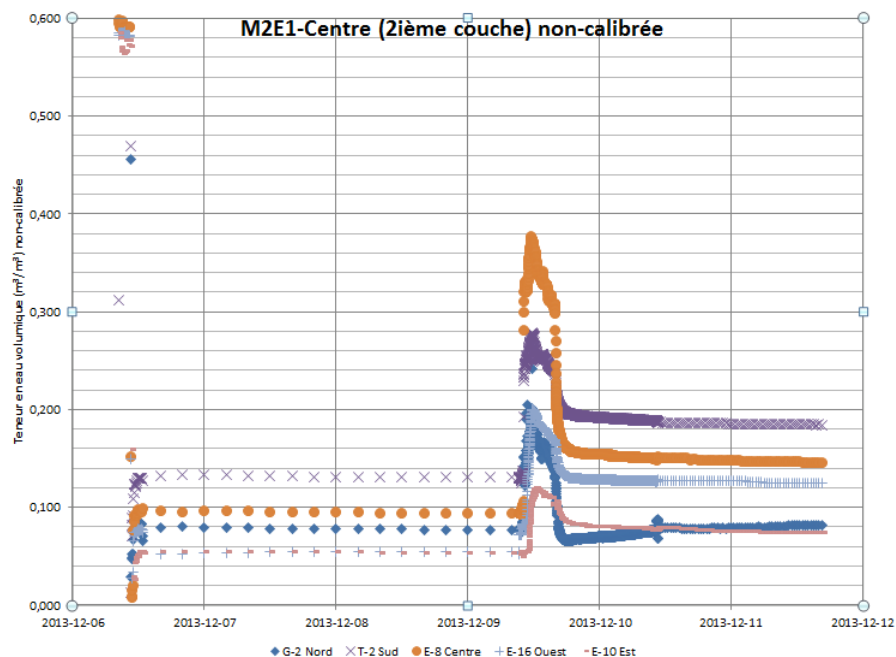


Figure A.18 : Résultats des sondes diélectriques couche du milieu M2E1

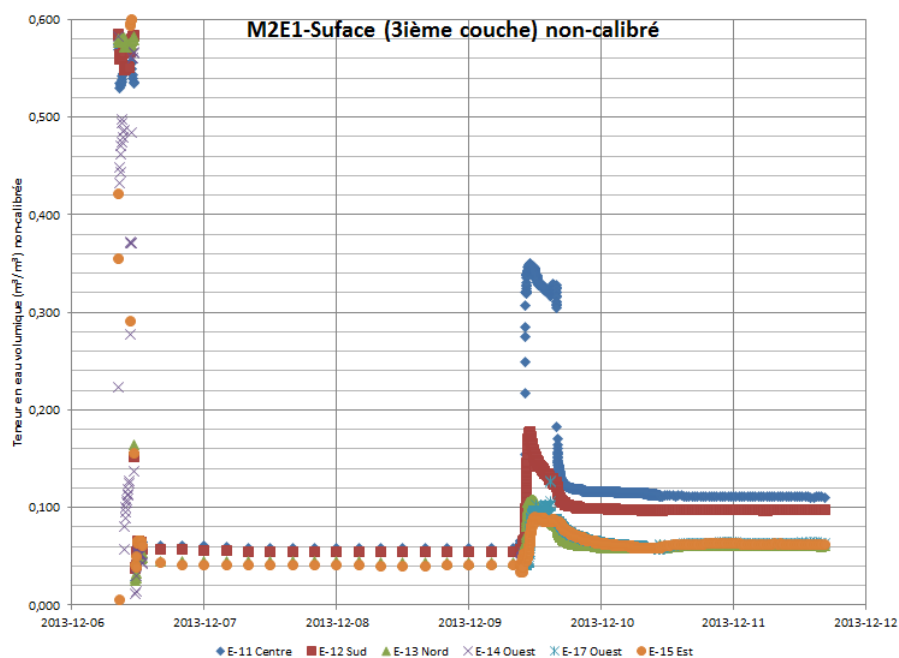


Figure A.19 : Résultats des sondes diélectriques couche de surface M2E1

Essai M2E2- cuve remplie

Saturation cuve début le 11 décembre à 16h45 par le bas de la cuve. Arrêt infiltration par le bas à 17h15 (après 30 min) parce que l'eau est en surface du sol. à 17h30 il ne semble pas y avoir de changement et il semblerait qu'il n'y a pas eu de drainage dans les 15 dernières minutes. Donc réapplication de l'infiltration par le bas de la cuve à faible débit à 17h30 (45min). Sol à la surface se détache pendant la saturation par le bas.

La cuve est laissée toute la nuit pour saturer complètement.

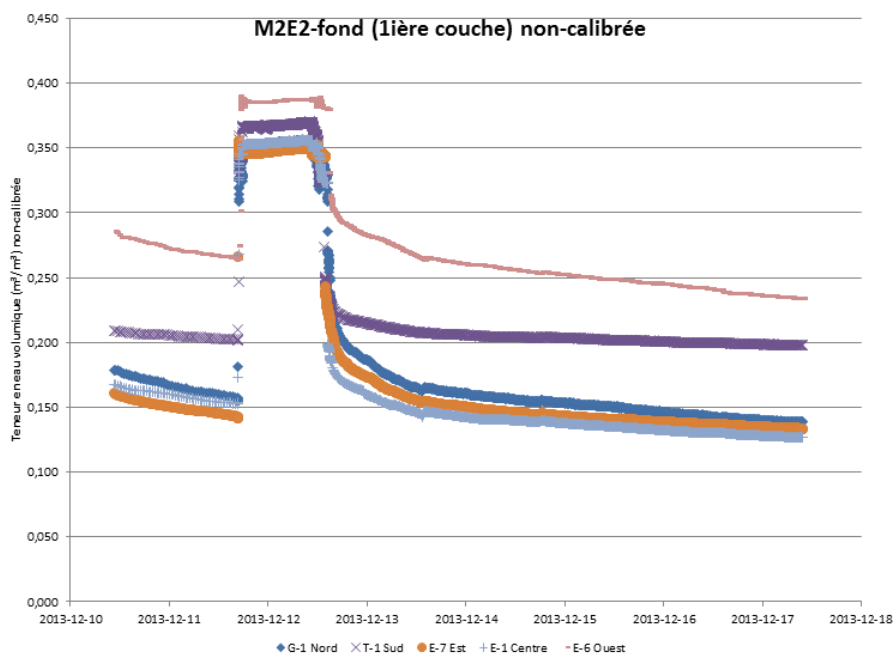


Figure A.20 : Résultats des sondes diélectriques couche du fond M2E2

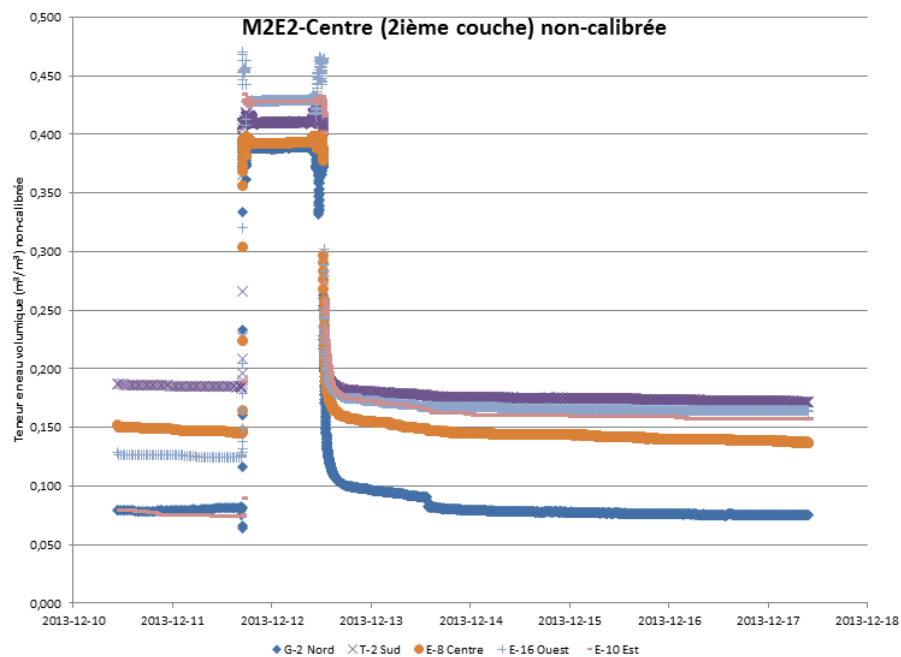


Figure A.21 : Résultats des sondes diélectriques couche du milieu M2E2

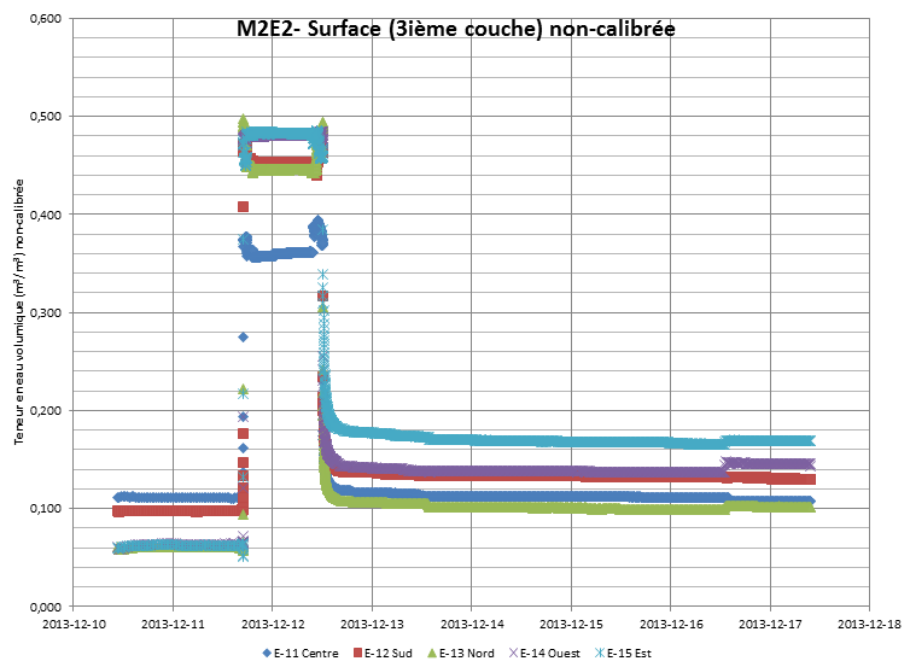


Figure A.22 : Résultats des sondes diélectriques couche de surface M2E2

Essai M2E3- infiltration par l'anneau au centre de la cuve

Une sonde à pression a enregistré la pression atmosphérique pendant l'essai. L'essai a été arrêté avant d'atteindre la teneur en eau volumique résiduelle, car l'essai 4 (M2E4) est une reproduction de M2E3 et l'essai 4 sera laissé au repos durant la période de Noël afin d'atteindre la teneur en eau résiduelle.

Résultats des sondes Echo-5, 5TM et GS3 non calibrées pour chacune des couches de sol compacté

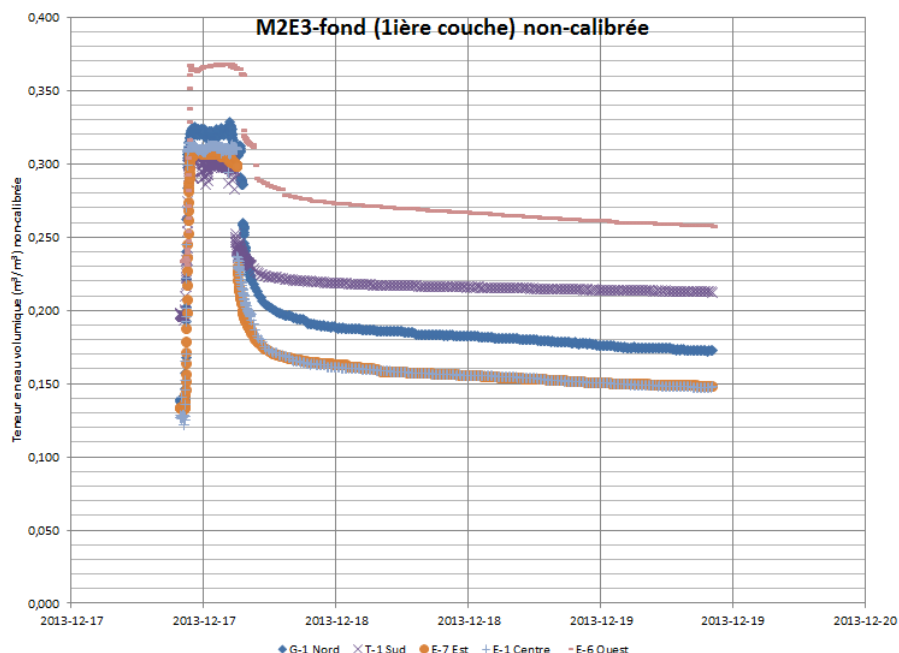


Figure A.23 : Résultats des sondes diélectriques couche du fond M2E3

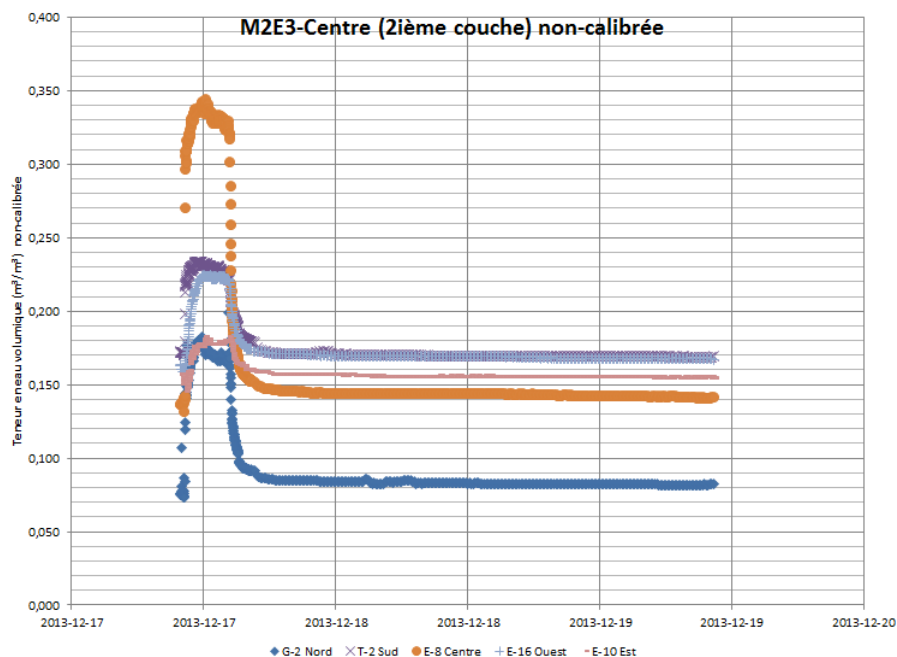


Figure A.24 : Résultats des sondes diélectriques couche du centre M2E3

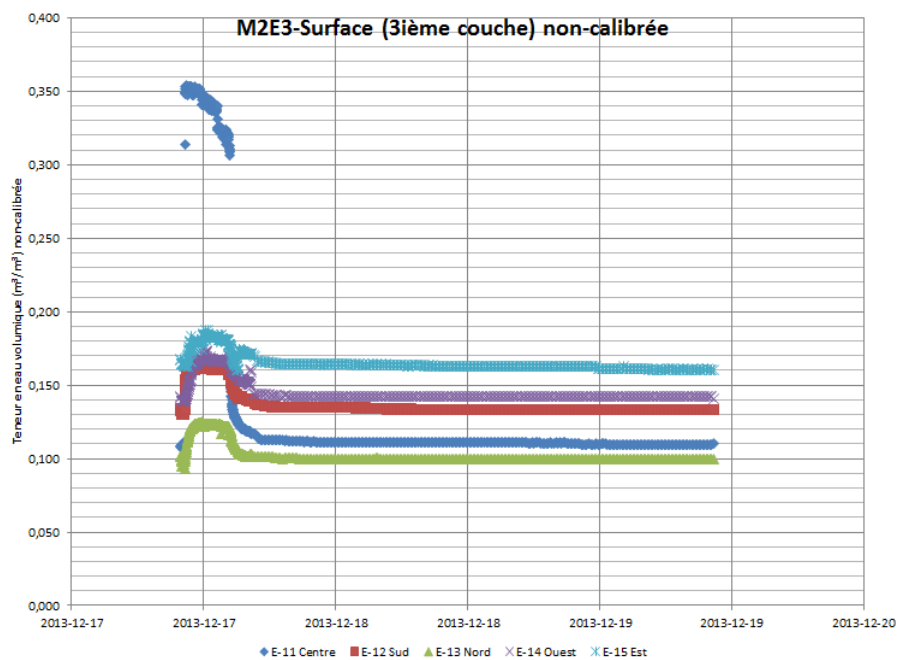


Figure A.25 : Résultats des sondes diélectriques couche de surface M2E3

M2E4- Répétition M2E3 – infiltration par l’anneau au centre de la cuve

Une sonde à pression a enregistré la pression atmosphérique pendant l'essai. L'essai a été laissé au repos durant la période de Noël afin d'atteindre la teneur en eau résiduelle.

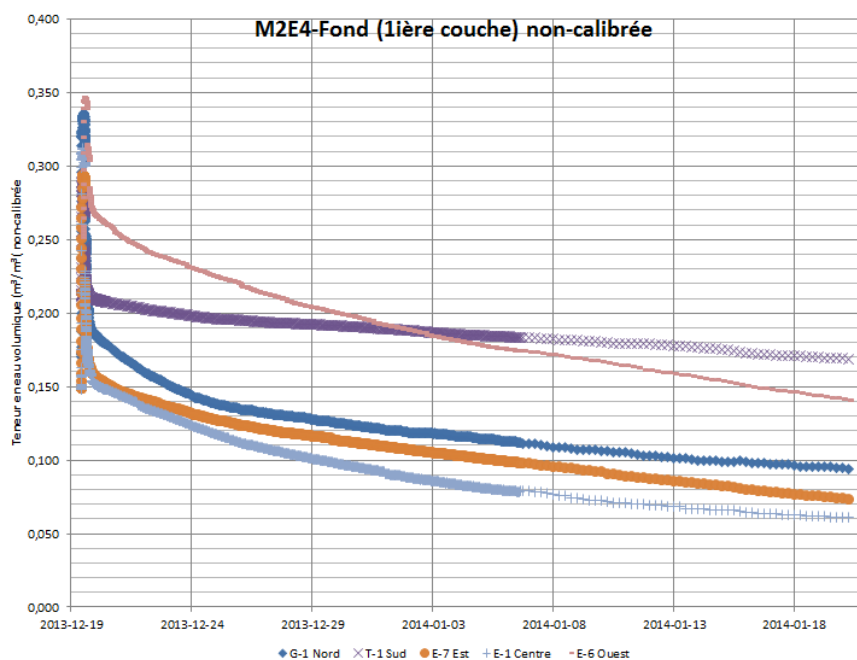


Figure A.26 : Résultats des sondes diélectriques couche du fond M2E4

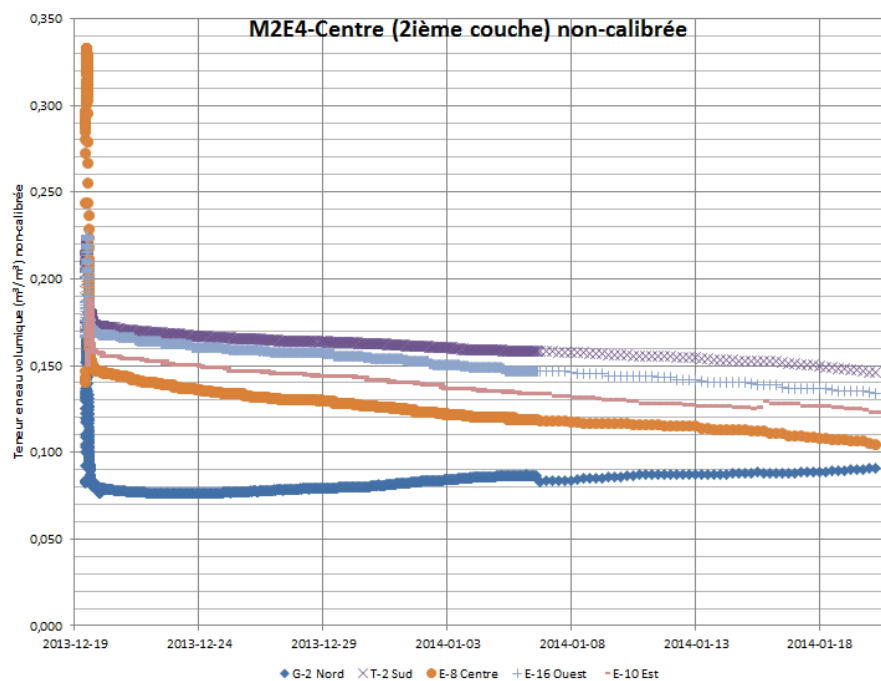


Figure A.27 : Résultats des sondes diélectriques couche du centre M2E4

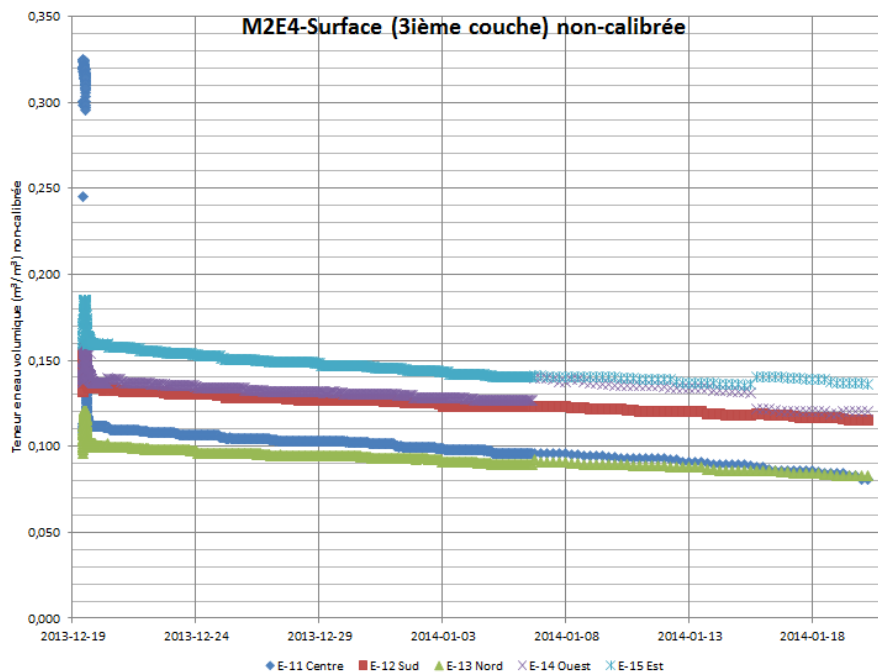


Figure A.28 : Résultats des sondes diélectriques couche de surface M2E4

Montage 3 – Compaction élevée

Compaction élevée – disque tombé à 30cm de hauteur pour chacune des couche de sol. Un changement moyen de la hauteur de chacune des couches avec la compaction de 1,1cm.

Infiltromètre enfoncé dans le sol sur 7,5cm de profondeur.

Tableau A.4 : Caractérisation des stériles au montage M3

	Montage cuve M3	Démontage cuve M3 - En fonction des poids et teneurs en eau	Démontage cuve M3 - En fonction des résultats du cône de sable
Poids total sec, W_s (kg)	336,03	332,14	
Volume humide, V_T (cm ³)	193 230	186 949	
Densité sèche, ρ_d (kg/m ³)	1 746,3	1 776,6	1 876,3
Densité humide, ρ_m (kg/m ³)	17,1	1 809,0	1 909,5
Poids unitaire sec, γ_d (kN/m ³)	17,05	17,38	18,40
Teneur en eau massique moyenne, w (%)	3,7%	1,7%	1,8%
Indice des vides, e	0,57	0,55	0,46
Porosité, n	0,36	0,35	0,31
Saturation, S (%)	18%	9%	11%
Teneur en eau volumique, θ	0,06	0,03	0,03
Affaissement moyen entre montage et démontage (cm)	S.O.	(1,0)	S.O.
Poids total sec des particules fines récupérés dans l'eau (g)		78,1	
Hauteur de tombé du disque de compaction (cm)	30		

M3E1-infiltration par l'anneau au centre de la cuve

- Une sonde à pression a enregistré la pression atmosphérique pendant l'essai.
- L'exfiltration a débuté à 57m20s.
- L'infiltration a duré 7h. Il y a eu un écoulement à l'exfiltration pendant 4h après l'arrêt de l'infiltration.
- Deux cellules Mariotte remplit d'eau ont été nécessaires pour compléter l'essai.

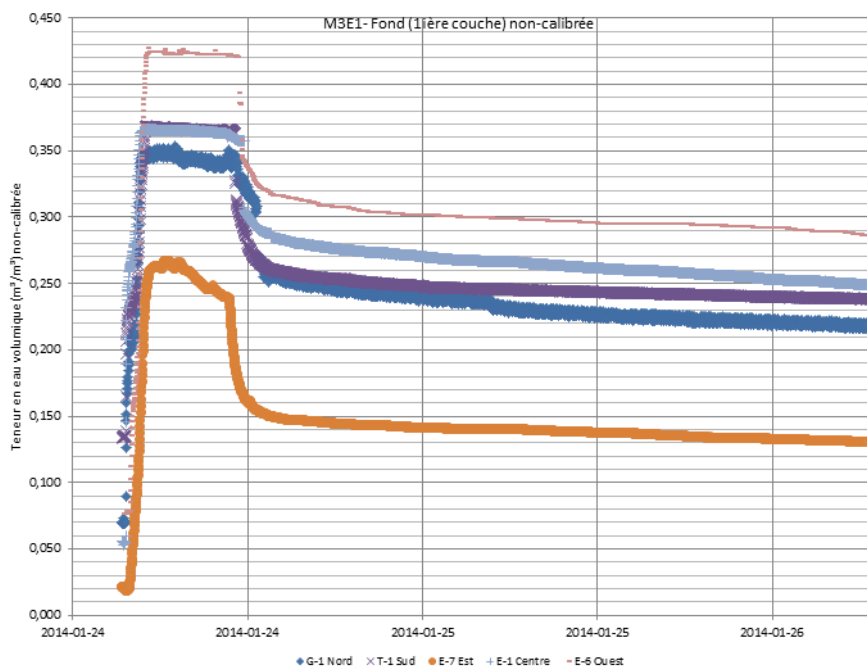


Figure A.29 : Résultats des sondes diélectriques couche du fond M3E1.

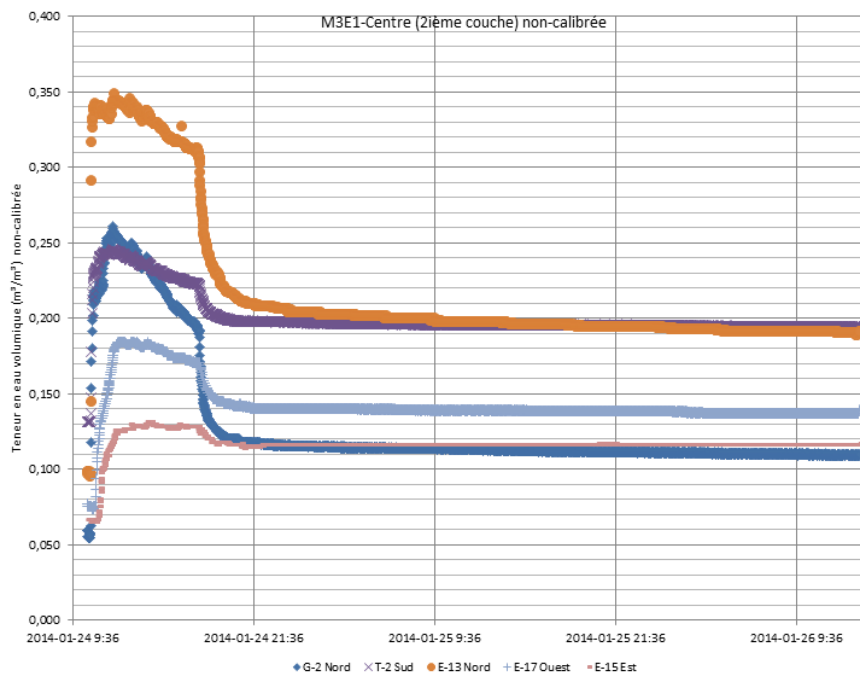


Figure A.30 : Résultats des sondes diélectriques couche du centre M3E1.

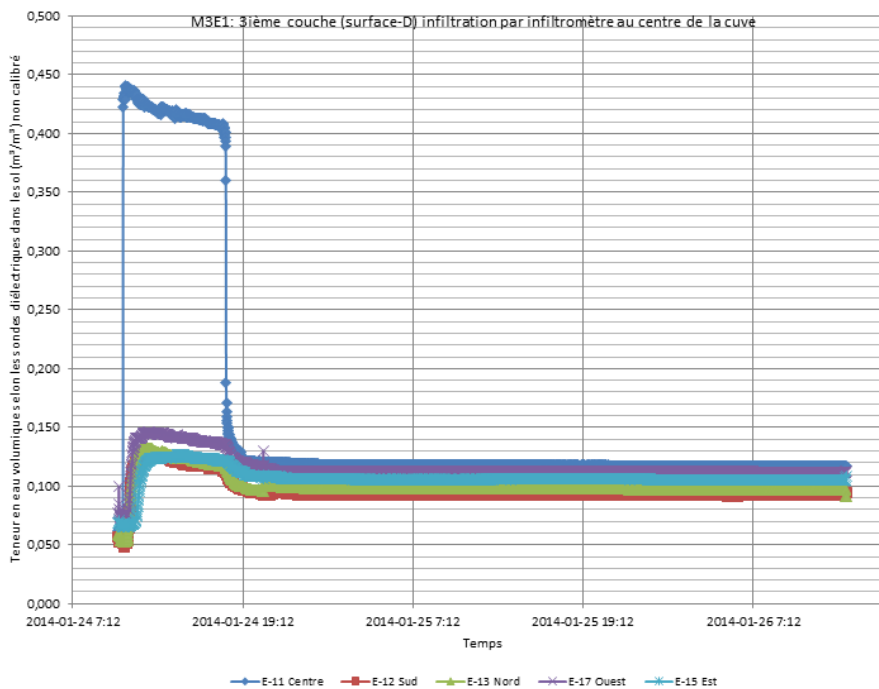


Figure A.31 : Résultats des sondes diélectriques couche de surface M3E1.

M3E2-cuve rempli

Résultats préliminaires des teneurs en eau volumique mesurées dans la cuve pour le montage 3 (M3) en conditions presque saturées (cuve rempli d'eau par le bas et le haut).

Les graphiques montrent les valeurs non corrigées et les valeurs corrigées avec la calibration disponible. La calibration devra être raffinée au cours des prochains mois, mais ça donne une idée. Je n'ai pas affiché les sondes pour lesquels je n'ai aucune mesure de calibration dans les graphiques de données calibrées.

Notes :

- À noter que la sonde 'E-15 est' a été partiellement exposée lors du remplissage ce qui explique le changement drastique des mesures de cette sonde.
- Une sonde à pression a enregistré la pression atmosphérique pendant l'essai.
- Hauteur de l'eau dans la cuve d'environ 16cm.
- L'exfiltration a débuté à 0s.
- L'infiltration a duré 1h30. Il y a eu un écoulement à l'exfiltration pendant 8h30 après l'arrêt de l'infiltration.

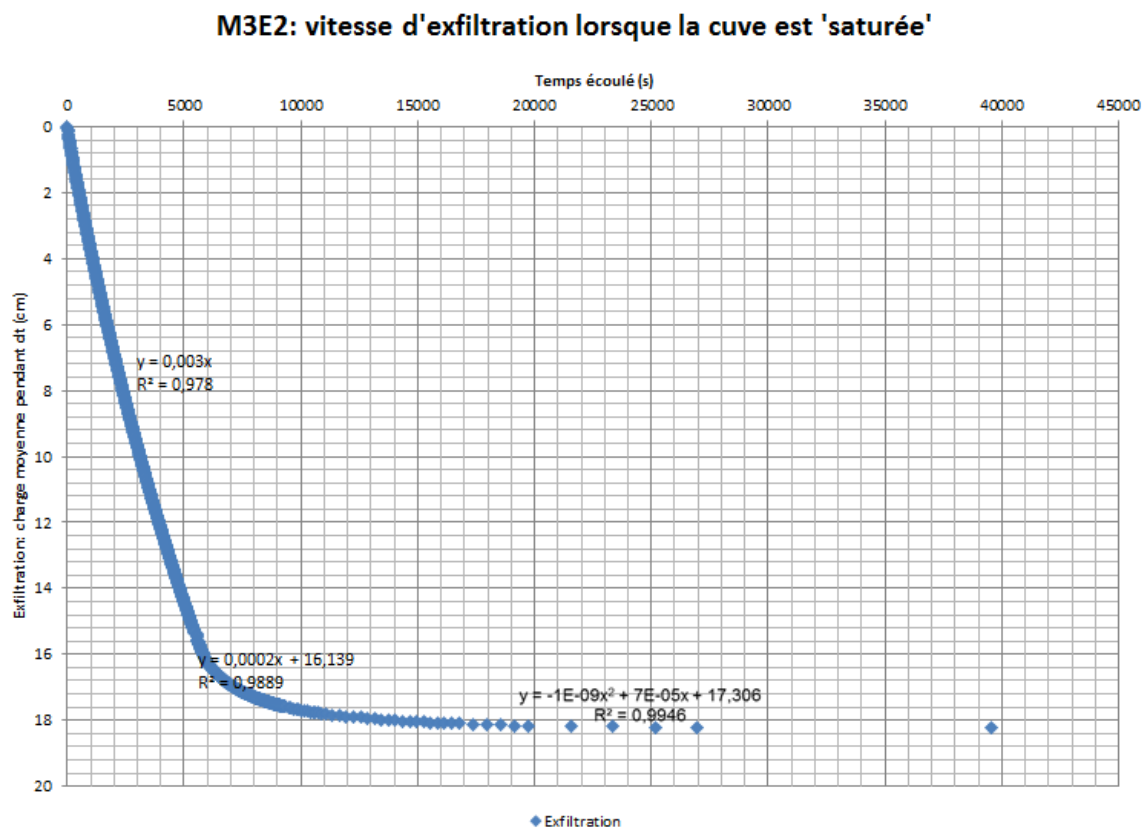


Figure A.32 : Relation entre la charge d'eau et le temps écoulé pendant l'essai de drainage M3E2.

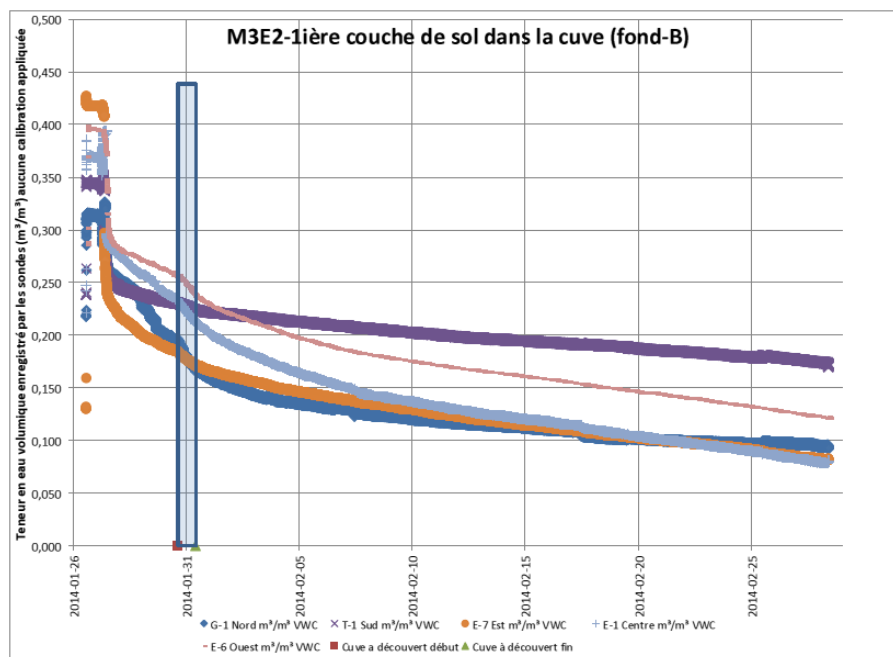


Figure A.33 : Résultats des sondes diélectriques couche du fond M3E2.

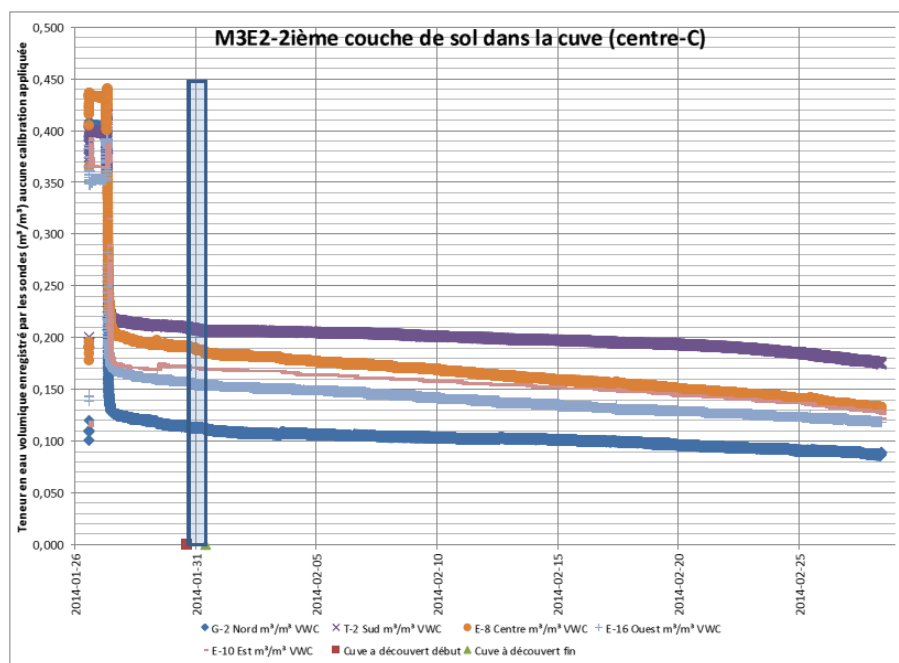


Figure A.34 : Résultats des sondes diélectriques couche du centre M3E2.

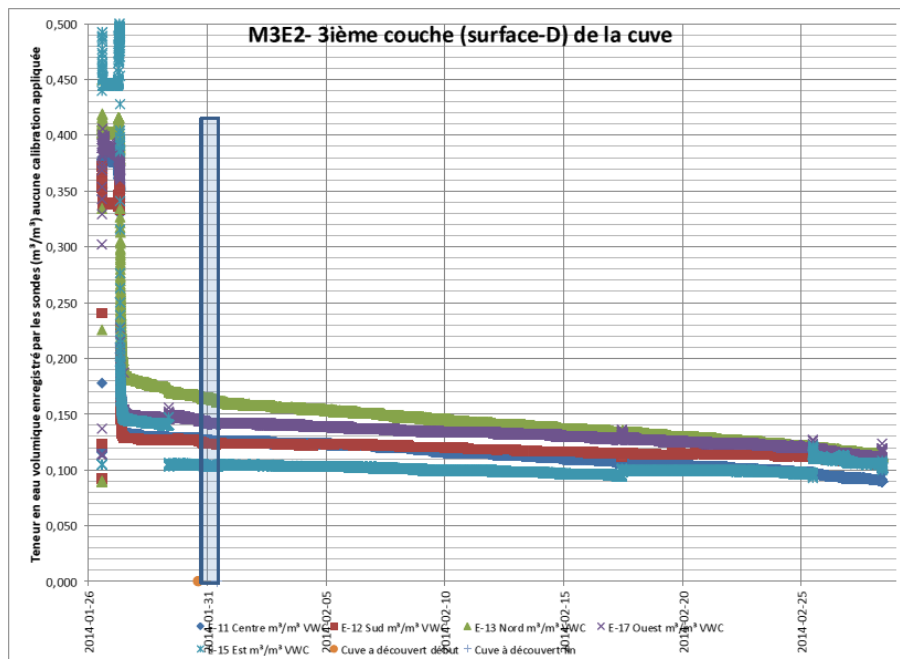


Figure A.35 : Résultats des sondes diélectriques couche de surface M3E2.

M3E3-infiltration par l'anneau au centre de la cuve

Sonde E-15 (couche de surface) est placée très près de la surface et semble être influencée par l'air ambiant.

- Une sonde à pression a enregistré la pression atmosphérique pendant l'essai.
- L'exfiltration a débuté à 58m18s.
- L'infiltration a duré 6h. Il y a eu un écoulement à l'exfiltration pendant 4h après l'arrêt de l'infiltration.
- Deux cellules Mariotte remplies d'eau ont été nécessaires pour compléter l'essai.

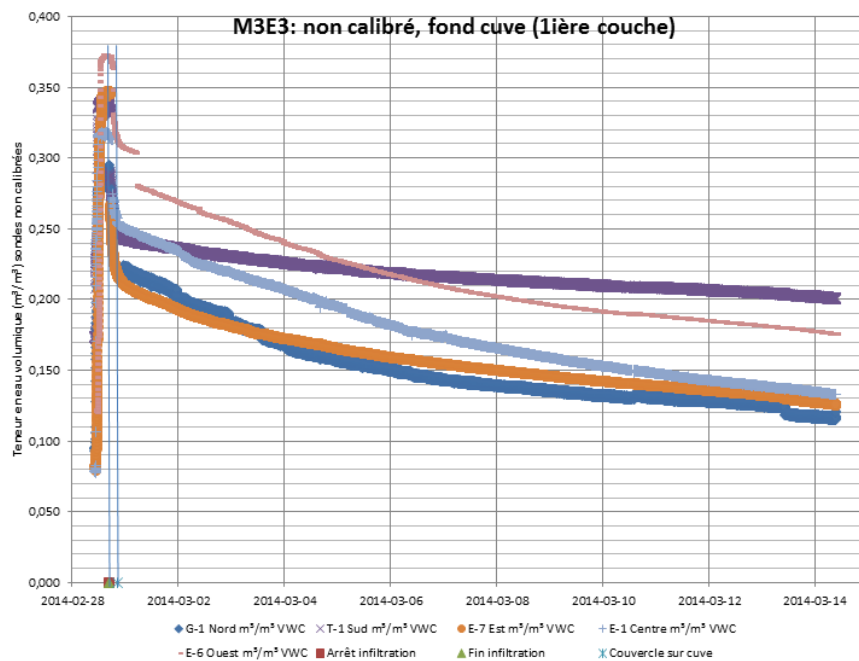


Figure A.36 : Résultats des sondes diélectriques couche du fond M3E3.

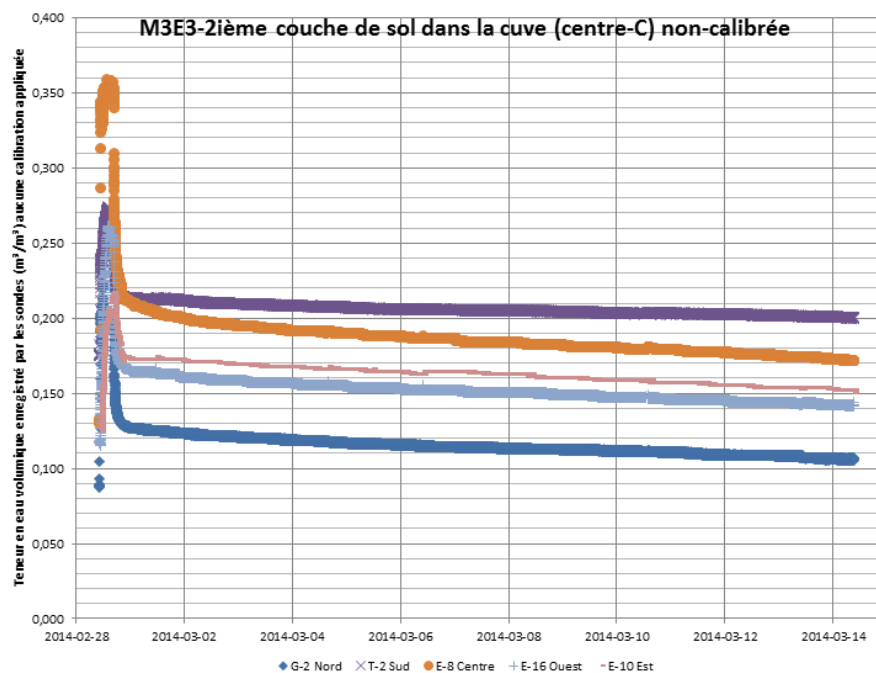


Figure A.37 : Résultats des sondes diélectriques couche du centre M3E3.

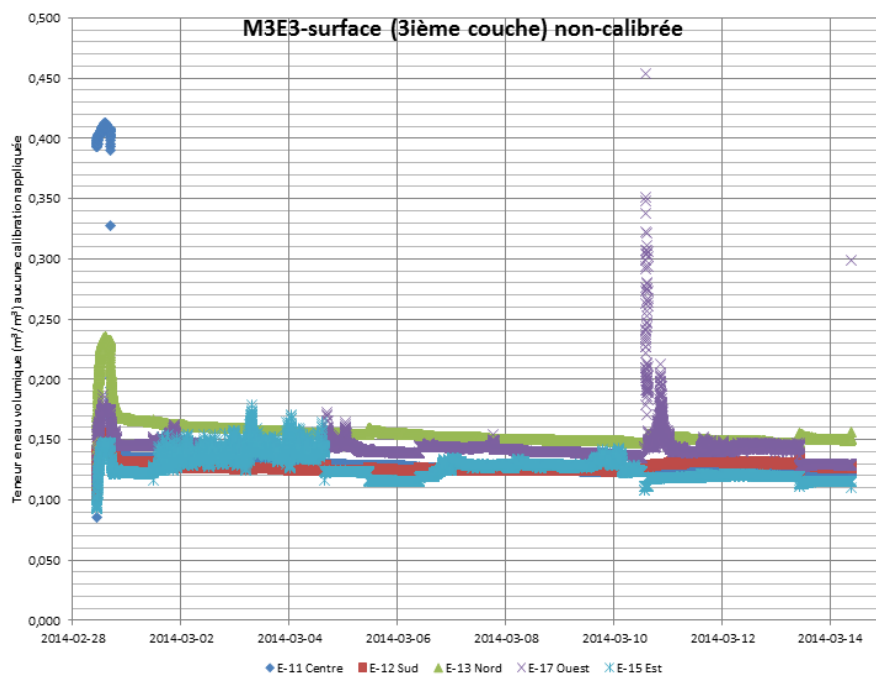


Figure A.38 : Résultats des sondes diélectriques couche de surface M3E3.

M3E4-répétition M3E3, infiltration par l'anneau au centre de la cuve

Essai en cours, résultats non compilés.

- Une sonde à pression a enregistré la pression atmosphérique pendant l'essai.
- L'exfiltration a débuté à 34m37s.
- L'infiltration a duré 4h. Il y a eu un écoulement à l'exfiltration pendant 4h après l'arrêt de l'infiltration.
- Une cellule Mariotte remplie d'eau a été nécessaire pour compléter l'essai.
- Cuve laissée à découvert après l'essai

Tableau A.5 : Sommaire des données au démontage M1

Sommaire données au démontage - M1														
	Teneur en eau massique moyenne	Teneur en eau massique médiane	Poids unitaire sec moyen	Poids unitaire sec médian	Porosité moyenne	Porosité médiane	Indice des vides moyen	Indice des vides médian	Saturation moyenne	Saturation médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane	Sondes	
	w%-moy %	w%-méd %	Yd-moy kN/m³	Yd-méd kN/m³	n-moy	n-méd	e-moy	e-méd	S-moy	S-méd	Θ-moy m³/m³	Θ-méd m³/m³	Θ-moy m³/m³	Θ-méd m³/m³
3ième couche (surface)	6,36%	6,35%	17,45		0,35		0,54		33%		0,11		0,14	0,14
2ième couche (milieu)	6,79%	6,51%	17,45		0,35		0,54		35%		0,12		0,11	0,11
1ière couche (bas)	10,07%	9,42%	17,45		0,35		0,54		53%		0,18		0,15	0,15
Sommaire données au démontage M1 - AVEC CÔNE DE SABLE														
	Teneur en eau massique moyenne	Teneur en eau massique médiane	Poids unitaire sec moyen	Poids unitaire sec médian	Porosité moyenne	Porosité médiane	Indice des vides moyen	Indice des vides médian	Saturation moyenne	Saturation médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane
	w%-moy %	w%-méd %	Yd-moy kN/m³	Yd-méd kN/m³	n-moy	n-méd	e-moy	e-méd	S-moy	S-méd	Θ-moy m³/m³	Θ-méd m³/m³	Θ-moy m³/m³	Θ-méd m³/m³
3ième couche (surface)	6,39%	6,39%	22,5	22,7	0,15	0,15	0,18	0,18	1,04	1,04	0,15	0,15	0,14	0,14
2ième couche (milieu)	6,40%	6,29%	18,5	18,4	0,31	0,32	0,46	0,46	0,39	0,36	0,12	0,11	0,11	0,11
1ière couche (bas)	9,38%	9,14%	17,5	18,8	0,35	0,30	0,53	0,43	0,55	0,57	0,19	0,17	0,15	0,15
Sommaire données au démontage M1 - 3ième couche														
	Teneur en eau massique moyenne	Teneur en eau massique médiane	Poids unitaire sec moyen	Poids unitaire sec médian	Porosité moyenne	Porosité médiane	Indice des vides moyen	Indice des vides médian	Saturation moyenne	Saturation médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane
	w%-moy %	w%-méd %	Yd-moy kN/m³	Yd-méd kN/m³	n-moy	n-méd	e-moy	e-méd	S-moy	S-méd	Θ-moy m³/m³	Θ-méd m³/m³	Θ-moy m³/m³	Θ-méd m³/m³
Démontage global	6,36%	6,35%	17,5	-	0,35	-	0,54	-	0,33	-	0,11	-	0,14	0,14
Cône de sable	6,39%	6,39%	22,5	22,7	0,15	0,15	0,18	0,18	1,04	1,04	0,15	0,15	0,14	0,14
Médiane	6,37%	6,37%	20,0		0,25		0,36		0,68		0,13		0,14	0,14
Écart	0,02%	0,03%	3,6		0,14		0,25		0,51		0,02		-	-
Valeur à utiliser	6,37%	6,37%	17,5		0,35		0,54		0,33		0,11		0,14	0,14

Tableau A.6 : Sommaire des données au démontage M1 (suite)

Sommaire données au démontage M1 - 2ième couche														
													Sondes	
	Teneur en eau massique moyenne	Teneur en eau massique médiane	Poids unitaire sec moyen	Poids unitaire sec médian	Porosité moyenne	Porosité médiane	Indice des vides moyen	Indice des vides médian	Saturation moyenne	Saturation médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane
	w%-moy %	w%-méd %	Yd-moy kN/m³	Yd-méd kN/m³	n-moy	n-méd	e-moy	e-méd	S-moy	S-méd	Θ-moy m³/m³	Θ-méd m³/m³	Θ-moy m³/m³	Θ-méd m³/m³
Démontage global	6,79%	6,51%	17,5	-	0,35	-	0,54	-	0,35	-	0,12	-	0,11	0,11
Cône de sable	6,40%	6,29%	18,5	18,4	0,31	0,32	0,46	0,46	0,39	0,36	0,12	0,11	0,11	0,11
Médiane	6,60%	6,40%	18,0		0,33		0,50		0,37		0,12		0,11	0,11
Écart	0,28%	0,16%	0,7		0,03		0,06		0,03		0,00		-	-
Valeur à utiliser	6,60%	6,40%	18,0	18,4	0,33	0,32	0,50	0,46	0,37	0,36	0,12	0,11	0,11	0,11
Sommaire données au démontage M1 - 1ière couche														
													Sondes	
	Teneur en eau massique moyenne	Teneur en eau massique médiane	Poids unitaire sec moyen	Poids unitaire sec médian	Porosité moyenne	Porosité médiane	Indice des vides moyen	Indice des vides médian	Saturation moyenne	Saturation médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane
	w%-moy %	w%-méd %	Yd-moy kN/m³	Yd-méd kN/m³	n-moy	n-méd	e-moy	e-méd	S-moy	S-méd	Θ-moy m³/m³	Θ-méd m³/m³	Θ-moy m³/m³	Θ-méd m³/m³
Démontage global	10,07%	9,42%	17,5	-	0,35	-	0,54	-	0,53	-	0,18	-	0,15	0,15
Cône de sable	9,38%	9,14%	17,5	18,8	0,35	0,30	0,53	0,43	0,55	0,57	0,19	0,17	0,15	0,15
Médiane	9,73%	9,28%	17,5		0,35		0,53		0,54		0,19		0,15	0,15
Écart	0,49%	0,20%	0,1		0,00		0,01		0,01		0,00		-	-
Valeur à utiliser	9,73%	9,28%	17,5	18,8	0,35	0,30	0,53	0,43	0,54	0,57	0,19	0,17	0,15	0,15
Valeurs à utiliser pour le démontage M1 (faible compaction)														
													Sondes	
	Teneur en eau massique moyenne	Teneur en eau massique médiane	Poids unitaire sec moyen	Poids unitaire sec médian	Porosité moyenne	Porosité médiane	Indice des vides moyen	Indice des vides médian	Saturation moyenne	Saturation médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane
	w%-moy %	w%-méd %	Yd-moy kN/m³	Yd-méd kN/m³	n-moy	n-méd	e-moy	e-méd	S-moy	S-méd	Θ-moy m³/m³	Θ-méd m³/m³	Θ-moy m³/m³	Θ-méd m³/m³
3ième couche (surface)	6,37%	6,37%	17,5	-	0,35	-	0,54	-	0,33	-	0,11	-	0,14	0,14
2ième couche (milieu)	6,60%	6,40%	18,0	18,4	0,33	0,32	0,50	0,46	0,37	0,36	0,12	0,11	0,11	0,11
1ière couche (fond)	9,73%	9,28%	17,5	18,8	0,35	0,30	0,53	0,43	0,54	0,57	0,19	0,17	0,15	0,15

Tableau A.7 : Sommaire des données au démontage M2

Sommaire données au démontage - M2														
	Teneur en eau massique moyenne	Teneur en eau massique médiane	Poids unitaire sec moyen	Poids unitaire sec médian	Porosité moyenne	Porosité médiane	Indice des vides moyen	Indice des vides médian	Saturation moyenne	Saturation médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane
	w%-moy	w%-méd	Yd-moy	Yd-méd	n-moy	n-méd	e-moy	e-méd	S-moy	S-méd	Θ-moy	Θ-méd	Θ-moy	Θ-méd
	%	%	kN/m³	kN/m³							m³/m³	m³/m³	m³/m³	m³/m³
3ième couche (surface)	4,99%	5,10%	18,82		0,30		0,42		33%		0,10		0,112	0,111
2ième couche (milieu)	5,20%	5,20%	18,25		0,32		0,47		31%		0,10		0,101	0,103
1ière couche (bas)	5,78%	5,84%	17,33		0,35		0,55		29%		0,10		0,103	0,101
Sommaire données au démontage M2 - AVEC CÔNE DE SABLE														
	Teneur en eau massique moyenne	Teneur en eau massique médiane	Poids unitaire sec moyen	Poids unitaire sec médian	Porosité moyenne	Porosité médiane	Indice des vides moyen	Indice des vides médian	Saturation moyenne	Saturation médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane
	w%-moy	w%-méd	Yd-moy	Yd-méd	n-moy	n-méd	e-moy	e-méd	S-moy	S-méd	Θ-moy	Θ-méd	Θ-moy	Θ-méd
	%	%	kN/m³	kN/m³							m³/m³	m³/m³	m³/m³	m³/m³
3ième couche (surface)	5,08%	5,04%	23,3	23,3	0,13	0,13	0,14	0,15	0,98	0,98	0,12	0,12	0,112	0,111
2ième couche (milieu)	5,18%	5,09%	23,3	23,3	0,13	0,13	0,15	0,15	0,95	0,95	0,12	0,12	0,101	0,103
1ière couche (bas)	6,01%	6,00%	23,0	23,2	0,14	0,13	0,16	0,15	1,05	1,08	0,14	0,14	0,103	0,101
Sommaire données au démontage M2 - 3ième couche														
	Teneur en eau massique moyenne	Teneur en eau massique médiane	Poids unitaire sec moyen	Poids unitaire sec médian	Porosité moyenne	Porosité médiane	Indice des vides moyen	Indice des vides médian	Saturation moyenne	Saturation médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane
	w%-moy	w%-méd	Yd-moy	Yd-méd	n-moy	n-méd	e-moy	e-méd	S-moy	S-méd	Θ-moy	Θ-méd	Θ-moy	Θ-méd
	%	%	kN/m³	kN/m³							m³/m³	m³/m³	m³/m³	m³/m³
Démontage global	4,99%	5,10%	18,8	-	0,30	-	0,42	-	0,33	-	0,10	-	0,11	0,11
Cône de sable	5,08%	5,04%	23,3	23,3	0,13	0,13	0,14	0,15	0,98	0,98	0,12	0,12	0,11	0,11
Médiane	5,03%	5,07%	21,1		0,21		0,28		0,65		0,11		0,11	0,11
Écart	0,06%	0,05%	3,2		0,12		0,20		0,46		0,02		-	-
Valeur à utiliser	5,03%	5,07%	18,8		0,30		0,42		0,33		0,10		0,11	0,11

Tableau A.8 : Sommaire des données au démontage M2 (suite)

Sommaire données au démontage M2 - 2ième couche														
													Sondes	
	Teneur en eau massique moyenne	Teneur en eau massique médiane	Poids unitaire sec moyen	Poids unitaire sec médian	Porosité moyenne	Porosité médiane	Indice des vides moyen	Indice des vides médian	Saturation moyenne	Saturation médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane
	w%-moy	w%-méd	Yd-moy	Yd-méd	n-moy	n-méd	e-moy	e-méd	S-moy	S-méd	Θ-moy	Θ-méd	Θ-moy	Θ-méd
	%	%	kN/m³	kN/m³							m³/m³	m³/m³	m³/m³	m³/m³
Démontage global	5,20%	5,20%	18,3	-	0,32	-	0,47	-	0,31	-	0,10	-	0,10	0,10
Cône de sable	5,18%	5,09%	23,3	23,3	0,13	0,13	0,15	0,15	0,95	0,95	0,12	0,12	0,10	0,10
Médiane	5,19%	5,14%	20,8		0,22		0,31		0,63		0,11		0,10	0,10
Écart	0,01%	0,07%	3,6		0,13		0,23		0,46		0,02		-	-
Valeur à utiliser	5,19%	5,14%	18,3	-	0,32	-	0,47	-	0,31	-	0,10	-	0,10	0,10
Sommaire données au démontage M2- 1ière couche														
													Sondes	
	Teneur en eau massique moyenne	Teneur en eau massique médiane	Poids unitaire sec moyen	Poids unitaire sec médian	Porosité moyenne	Porosité médiane	Indice des vides moyen	Indice des vides médian	Saturation moyenne	Saturation médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane
	w%-moy	w%-méd	Yd-moy	Yd-méd	n-moy	n-méd	e-moy	e-méd	S-moy	S-méd	Θ-moy	Θ-méd	Θ-moy	Θ-méd
	%	%	kN/m³	kN/m³							m³/m³	m³/m³	m³/m³	m³/m³
Démontage global	5,78%	5,84%	17,3	-	0,35	-	0,55	-	0,29	-	0,10	-	0,10	0,10
Cône de sable	6,01%	6,00%	23,0	23,2	0,14	0,13	0,16	0,15	1,05	1,08	0,14	0,14	0,10	0,10
Médiane	5,90%	5,92%	20,2		0,25		0,36		0,67		0,12		0,10	0,10
Écart	0,16%	0,11%	4,0		0,15		0,27		0,53		0,03		-	-
Valeur à utiliser	5,90%	5,92%	17,3	-	0,35	-	0,55	-	0,29	-	0,10	-	0,10	0,10
Valeurs à utiliser pour le démontage M2 (moyenne compaction)														
													Sondes	
	Teneur en eau massique moyenne	Teneur en eau massique médiane	Poids unitaire sec moyen	Poids unitaire sec médian	Porosité moyenne	Porosité médiane	Indice des vides moyen	Indice des vides médian	Saturation moyenne	Saturation médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane
	w%-moy	w%-méd	Yd-moy	Yd-méd	n-moy	n-méd	e-moy	e-méd	S-moy	S-méd	Θ-moy	Θ-méd	Θ-moy	Θ-méd
	%	%	kN/m³	kN/m³							m³/m³	m³/m³	m³/m³	m³/m³
3ième couche (surface)	5,03%	5,07%	18,8	-	0,30	-	0,42	-	0,33	-	0,10	-	0,11	0,11
2ième couche (milieu)	5,19%	5,14%	18,3	-	0,32	-	0,47	-	0,31	-	0,10	-	0,10	0,10
1ière couche (fond)	5,90%	5,92%	17,3	-	0,35	-	0,55	-	0,29	-	0,10	-	0,10	0,10

Tableau A.10 : Sommaire des données au démontage M3 (suite)

Sommaire données au démontage M3- 2ième couche														
													Sondes	
	Teneur en eau massique moyenne	Teneur en eau massique médiane	Poids unitaire sec moyen	Poids unitaire sec médian	Porosité moyenne	Porosité médiane	Indice des vides moyen	Indice des vides médian	Saturation moyenne	Saturation médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane
	w%-moy %	w%-méd %	Yd-moy kN/m³	Yd-méd kN/m³	n-moy	n-méd	e-moy	e-méd	S-moy	S-méd	Θ-moy m³/m³	Θ-méd m³/m³	Θ-moy m³/m³	Θ-méd m³/m³
Démontage global	1,96%	1,98%	18,1	-	0,33	-	0,48	-	11%	0%	0,04	-	0,07	0,08
Cône de sable	2,01%	1,99%	23,4	24,7	0,13	0,08	0,15	0,09	50%	62%	0,05	0,05	0,07	0,08
Médiane	1,98%	1,98%	20,8		0,23		0,32		30%		0,04		0,07	0,08
Écart	0,04%	0,01%	3,8		0,14		0,23		27%		0,01		-	-
Valeur à utiliser	1,98%	1,98%	20,8	-	0,23	-	0,32	-	30%	0%	0,04	-	0,07	0,08
Sommaire données au démontage M3 - 1ière couche														
													Sondes	
	Teneur en eau massique moyenne	Teneur en eau massique médiane	Poids unitaire sec moyen	Poids unitaire sec médian	Porosité moyenne	Porosité médiane	Indice des vides moyen	Indice des vides médian	Saturation moyenne	Saturation médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane
	w%-moy %	w%-méd %	Yd-moy kN/m³	Yd-méd kN/m³	n-moy	n-méd	e-moy	e-méd	S-moy	S-méd	Θ-moy m³/m³	Θ-méd m³/m³	Θ-moy m³/m³	Θ-méd m³/m³
Démontage global	2,16%	2,15%	17,7	-	0,34	-	0,51	-	11%	0%	0,04	-	0,07	0,07
Cône de sable	2,07%	2,09%	23,3	23,6	0,13	0,12	0,15	0,13	40%	43%	0,05	0,05	0,07	0,07
Médiane	2,11%	2,12%	20,5		0,23		0,33		26%		0,04		0,07	0,07
Écart	0,06%	0,04%	4,0		0,15		0,26		20%		0,01		-	-
Valeur à utiliser	2,11%	2,12%	20,5	-	0,23	-	0,33	-	26%	0%	0,04	-	0,07	0,07
Valeurs à utiliser pour le démontage M3 (Forte compaction)														
													Sondes	
	Teneur en eau massique moyenne	Teneur en eau massique médiane	Poids unitaire sec moyen	Poids unitaire sec médian	Porosité moyenne	Porosité médiane	Indice des vides moyen	Indice des vides médian	Saturation moyenne	Saturation médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane	Teneur en eau volumique moyenne	Teneur en eau volumique médiane
	w%-moy %	w%-méd %	Yd-moy kN/m³	Yd-méd kN/m³	n-moy	n-méd	e-moy	e-méd	S-moy	S-méd	Θ-moy m³/m³	Θ-méd m³/m³	Θ-moy m³/m³	Θ-méd m³/m³
3ième couche (surface)	0,99%	0,96%	19,1	-	0,29	-	0,44	-	8,2%	0%	0,02	-	0,06	0,06
2ième couche (milieu)	1,98%	1,98%	20,8	-	0,23	-	0,32	-	30,5%	0%	0,04	-	0,07	0,08
1ière couche (fond)	2,11%	2,12%	20,5	-	0,23	-	0,33	-	25,6%	0%	0,04	-	0,07	0,07

ANNEXE B – RÉSULTATS DES ESSAIS EN COLONNES

B.

Montage des colonnes

Tableau B.1 : Sommaire des données montage colonne 6-5

Date	10-juin-14					
Participants	Isabelle Lévesque, Stéphanie Letourneur, Jérôme Goyer, Noura El-Harrak					
Projet	Mine Lac Tio Anorthosite tamisée 0-10 mm (échantillon été 2013)					
Sujet	Montage - Essais en colonne: perméabilité saturée, CRE					
Montage colonne #	colonne 6-5					
Début saturation à 16:01:55 par le bas de la colonne						
Activation des tensiomètres à 16:01:55						
Changement échantillon de sol pour la couche 22						
L'eau désaérée par le bas de la colonne a été arrêté le matin du 11 juin 2014						
Pression positive insérée par le haut de la colonne vers 10am le 11 juin 2014						
Vide appliqué sur le haut de la colonne le vendredi 13 juin 2014 et des sédiments se sont déplacés vers le haut						
Eau désaérée de la colonne mariotte est appliquée à la base de la colonne pour la saturer tranquillement. Matin 16 juin 2014						
Masse colonne pleine d'eau désaéré sans accessoires (g)	Me+col	50,2 kg				
Masse colonne sèche sans accessoires (g)	M ₁	29,8 kg				
Masse colonne remplie du matériau humide (g)	M ₂	74,8 kg				
Masse geotextile, plaque perforée - FOND	Macc-fond	86,4 g				
Masse geotextile, plaque perforée et ressort - SURFACE	Macc-surface	212,4 g				
Masse geotextile, plaque perforée et ressort	Maccessoire	298,8 g				
Masse colonne remplie du matériau humide (g) + tensiomètres	M ₂	77,0 kg				
Masse eau colonne pleine	Me	20,4 kg				
Masse sol humide	Mh	44,7 kg				

Tableau B.2 : Sommaire des données montage colonne 6-5 (suite)

Masse solides	Ms	42,0	kg
Masse eau au moment du montage	Mw	2,7	kg
Volume eau supplémentaire pour saturation à 100%	Vw-sat	1 244,1	cm³
Masse eau supplémentaire pour atteindre saturation à 100%	Mw-sat	1,2	kg
Masse totale de la colonne pour atteindre saturation à 100%	MT-sat	78,2	kg
Volume eau supplémentaire pour saturation à 90%	Vw-90	1 119,7	kg
Masse eau supplémentaire pour atteindre saturation à 90%	Mw-90	1,1	kg
Masse totale de la colonne pour atteindre saturation à 90%	MT-90	78,1	kg
Volume eau supplémentaire pour saturation à 80%	Vw-80	995,3	kg
Masse eau supplémentaire pour atteindre saturation à 80%	Mw-80	1,0	kg
Masse totale de la colonne pour atteindre saturation à 80%	MT-80	78,0	kg
Volume colonne	V	19 356,0	cm³
Volume vides au montage	Vv	4 021,8	cm³
Degree de saturation au montage	Sr	0,669	%

Tableau B.3 : Teneur en eau massique sol dans la colonne

Teneur en eau massique sol dans la colonne								
Couche	Nom tare	Masse tare (g)	Masse sol + tare (g)	Masse sol sec + tare (g)	Masse eau (Mw) (g)	Masse sol (Ms) (g)	Teneur en eau massique (%)	Profondeur moyenne de la couche (cm)
2	10	175,4	437,7	421,1	16,6	245,7	6,76	112,36
6	120	131,4	962,6	912	50,6	780,6	6,48	90,82
9	106	127,2	869,4	824,4	45,0	697,2	6,45	74,64
12	103	122,8	764,0	724,8	39,2	602	6,51	58,90
16	P6	198,4	821,2	784,2	37,0	585,8	6,32	36,74
21	104	124,5	865,7	824,7	41,0	700,2	5,86	9,74
22	125	127,1	1064,5	1008,4	56,1	881,3	6,37	4,08
						moyenne	6,39	

Tableau B.5 : Sommaire des données de montage de la colonne 6-5

Date		10-juin-14					
Participants		Isabelle Lévesque, Stéphanie Letourneur, Jérôme Goyer, Noura El-Harrak					
Projet		Mine Lac Tio Anorthosite tamisée 0-10 mm (échnatillon été 2013)					
Sujet		Montage - Essais en colonne: perméabilité saturée, CRE					
Montage colonne #		colonne 6-5					
Marteau de compaction utilisé		pour Proctor modifié					
Poids du marteau (g)		4538,7g 25 coups par couche					
Couche	Profondeurs mesurées (cm)					Poids sol (g)	Moyenn e profonde urs (cm)
	1	2	3	4	5		
Section du bas							
vide sans geotext.	62,1	62,2	62,1	62,1	62,2		62,1
vide avec geotext	61,2	61,2	61,1	61,2	61,1		61,2
1	55,5	55,6	55,5	55,9	55,8	2018,1	55,7
2	49,8	50,3	49,5	49,8	50	2099,2	49,9
3	44,6	44,6	44,4	44,8	44,8	2034,4	44,6
4	39,3	39,2	39,3	39,4	39,3	2017,8	39,3
5	33,8	33,9	34,3	33,6	34,2	2011,6	34,0
6	28,5	28,1	28,3	28,2	28,6	2077,2	28,3
7	22,5	23	22,9	22,6	23,3	2037	22,9
8	17,6	17,7	17,6	17,6	17,7	2012,8	17,6
9	12,4	11,8	12,5	11,7	12,4	2045,3	12,2
10	6,9	6,6	6,8	6,7	7,1	2047,9	6,8
ajout section du haut							62,5
10	69,5	69,1	69,5	69	69,4	2047,9	
vide sans geotext.	124,6	124,7	124,6	124,6	124,7		124,6
vide avec geotext	123,7	123,7	123,6	123,7	123,6		123,6
1	118,0	118,1	118,0	118,4	118,3	2018,1	118,1
2	112,3	112,8	112,0	112,3	112,5	2099,2	112,4

Tableau B.6 : Sommaire des données de montage de la colonne 6-5 (suite)

Couche	Profondeurs mesurées (cm)					Poids sol (g)	Moyenn e profonde urs (cm)
	1	2	3	4	5		
3	107,1	107,1	106,9	107,3	107,3	2034,4	107,1
4	101,8	101,7	101,8	101,9	101,8	2017,8	101,8
5	96,3	96,4	96,8	96,1	96,7	2011,6	96,4
6	91,0	90,6	90,8	90,7	91,1	2077,2	90,8
7	85,0	85,5	85,4	85,1	85,8	2037	85,3
8	80,1	80,2	80,1	80,1	80,2	2012,8	80,1
9	74,9	74,3	75,0	74,2	74,9	2045,3	74,6
10	69,5	69,1	69,5	69	69,4	2047,9	69,3
Section du haut							
11	63,7	64,5	63,9	63,8	64,5	2003,5	64,1
12	58,5	59,3	58,9	58,7	59,1	2054	58,9
13	53,2	53,2	53,2	53,2	53,5	2067,5	53,3
14	47,5	48,1	47,5	47,8	48,1	2018	47,8
15	42,4	42,6	42,2	42,7	42,7	2000,8	42,5
16	36,6	37,1	36,1	36,8	37,1	2082,8	36,7
17	31,5	31,4	31,5	31,4	31,7	2027,9	31,5
18	26,1	25,5	26,1	25,4	26,2	2081,1	25,9
19	20,3	20,4	20,7	20	20,7	2041,3	20,4
20	15	15,7	15,3	15,1	15,4	2015,3	15,3
21	9,8	9,4	9,5	9,9	10,1	2004	9,7
22	3,9	3,9	4,2	3,9	4,5	2054,6	4,1
aque et ge	3	3,1	3,1	3	3,1		3,1

Tableau B.7 : Sommaire des données colonne 9-11

Date	09-juin-14					
Participants	Isabelle Lévesque, Stéphanie Letourneur, Jérôme Goyer, Noura El-Harrak					
Projet	Mine Lac Tio Anorthosite tamisée 0-10 mm (échantillon été 2013)					
Sujet	Montage - Essais en colonne: perméabilité saturée, CRE					
Montage colonne #	colonne 9-11					
Début saturation à 16:50:52 par le bas de la colonne						
Activation des tensiomètres à 17:05:36						
La colonne d'eau désaérée n'était pas à pression d'eau atmosphérique donc la connection a été refaite à 17:27:33						
L'eau désaérée par le bas de la colonne a été arrêté e après-midi du 10 juin 2014						
Pression positive inséré par le haut de la colonne vers 10am le 11 juin 2014						
Vide appliqué sur le haut de la colonne le vendredi 13 juin 2014 et des sédiments se sont déplacés vers le haut						
Eau désaérée de la colonne mariotte est appliquée à la base de la colonne pour la saturer tranquillement. Matin 16 juin 2014						
Masse colonne plein d'eau désaéré sans accessoires (g)	Me+col	50,8	kg			
Masse colonne sèche sans accessoires (g)	M ₁	30,4	kg			
Masse colonne remplie du matériau humide (g)	M ₂	75	kg			
Masse geotextile, plaque perforée - FOND	Macc-fond	95,5	g			
Masse geotextile, plaque perforée et ressort - SURFACE	Macc-surface	122	g			
Masse geotextile, plaque perforée et ressort	Maccessire	217,5	g			
Masse colonne remplie du matériau humide (g) + tensiomètres	M ₂	76,8	kg			
Masse eau colonne pleine	Me	20,4	kg			
Masse sol humide	M	44,383	kg			
Masse solides	Ms	41,846	kg			
Masse eau au moment du montage	Mw	2,5	kg			
Volume eau supplémentaire pour saturation à 100%	Vw-sat	1 673,0	cm ³			
Masse eau supplémentaire pour atteindre saturation à 100%	Mw-sat	1,7	kg			
Masse totale de la colonne pour atteindre saturation à 100%	MT-sat	78,5	kg			
Volume eau supplémentaire pour saturation à 90%	Vw-90	1 505,7	kg			
Masse eau supplémentaire pour atteindre saturation à 90%	Mw-90	1,5	kg			
Masse totale de la colonne pour atteindre saturation à 90%	MT-90	78,3	kg			
Volume eau supplémentaire pour saturation à 80%	Vw-80	1 338,4	kg			
Masse eau supplémentaire pour atteindre saturation à 80%	Mw-80	1,3	kg			
Masse totale de la colonne pour atteindre saturation à 80%	MT-80	78,1	kg			
Volume colonne	V	19 590,6	cm ³			
Volume vides au montage	Vv	4 318,2	cm ³			
Degree de saturation au montage	Sr	0,588	%			

Essais de perméabilité

Tableau B.10 : Données du montage de l'essai de perméabilité #1 colonne 9-11

Conductivité hydraulique à charge constante des roches stériles				
Mine Tio - 0-10mm tamisé				
Échantillon reçu été 2013				
Information générale				
Testé par:	Isabelle Lévesque, Richard Toussaint, Jérôme Goyer, Stéphanie Letourneur			
Laboratoire	IRME			
Date testé:	16-juil-14 Essai 1			
Projet:	Colonne 9-11 pour déterminer la courbe de rétention d'eau (CRE-B)			
Détails du test				
Diamètre max. particules	10 mm			
Diamètre du moule, D	14,4 cm			
Masse cellule vide et connections, M ₁	31 917,5 g			
Masse cellule eau désaéré et connections, M _e	51 816,1 g			
Masse cellule sol, air, connections, M ₂	76 301,3 g			
Masse cellule sol, eau, air, connections, M _{tot}	77 798,6 g			
Masse sol humide, M _{ms}	45 521,8 g			
Masse sèche du sol, M _s	43 164,0 g			
Masse eau, M _{win}	2 357,8 g			
Masse eau, M _{wf}	2 157,8 g			
Teneur en eau massique initiale, w _{in}	5,5 %			
Teneur en eau massique finale, w _f	5,0 %			
Densité relative du sol, G _s	2,745			
Indice des vides, e	0,310			
Porosité initial, n	0,237			
Volume des vides, V _v	3 824,9 cm ³			
Volume des pores, V _p	4 641,5 cm ³			
Volume eau, V _w	2 364,1 cm ³			
Niveau de saturation	62 %			
Aire de l'échantillon, A	162,18 cm ²			
Longueur de l'échantillon, L _f	120,80 cm			
Volume total, V _t	19 591,62 cm ³			
Aire du réservoir intrant, a _{in}	0,21 cm ²			
Aire du réservoir extrant, a _{out}	0,21 cm ²			
Température eau, T	23,9 °C			
Densité sèche initial, ρ _{di}	2,09 g/cm ³			
Densité sèche finale, ρ _{df}	2,10 g/cm ³			
Densité de l'eau, ρ _w	0,997 g/cm ³			
Facteur de correction, R _T à 20°C	0,896			
Précision de la balance utilisée:	200 g			
Méthode de préparation de l'échantillon:				
Moyenne k20	5,2E-04 cm/s			
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard				
Selon la procédure standard ASTM D5856-95(2002), le gradient hydraulique maximal recommandé est de 2 pour un sol dont la conductivité hydraulique prédite est à plus de 10 ⁻⁴ cm/s.				

Tableau B.11 : Données de l'essai de perméabilité #1 colonne 9-11

Mesures et calculs								
Test no.	Changement de charge (Δh)	Gradient hydraulique (i)	Volume (Q)	Temps (t)	Débit (q)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Porosité pendant l'essai N _{pv}
0	cm		cm ³	s	cm ³ /s	cm/s	cm/s	
1	160,63	1,33	-	-				
2	160,6	1,33	0,60	5	0,12	5,58E-04	1,17E-03	0,00
3	160,6	1,33	1,20	10	0,12	5,58E-04	1,17E-03	0,00
4	160,6	1,33	1,70	15	0,11	5,27E-04	1,11E-03	0,00
5	160,6	1,33	2,41	20	0,12	5,58E-04	1,17E-03	0,00
6	160,6	1,33	2,81	25	0,11	5,21E-04	1,09E-03	0,00
7	160,5	1,33	3,31	30	0,11	5,12E-04	1,07E-03	0,00
8	160,5	1,33	3,81	35	0,11	5,05E-04	1,06E-03	0,00
9	160,5	1,33	4,21	40	0,11	4,89E-04	1,03E-03	0,00
10	160,5	1,33	4,71	45	0,10	4,86E-04	1,02E-03	0,00
11	160,5	1,33	5,21	50	0,10	4,84E-04	1,02E-03	0,00
12	160,5	1,33	5,51	55	0,10	4,65E-04	9,77E-04	0,00
13	160,4	1,33	6,02	60	0,10	4,65E-04	9,77E-04	0,00
14	160,4	1,33	6,52	65	0,10	4,66E-04	9,77E-04	0,00
15	160,4	1,33	6,82	70	0,10	4,52E-04	9,49E-04	0,00
16	160,4	1,33	7,22	75	0,10	4,47E-04	9,38E-04	0,00
17	160,4	1,33	7,52	80	0,09	4,37E-04	9,16E-04	0,00
18	160,4	1,33	8,02	85	0,09	4,38E-04	9,20E-04	0,00
19	160,3	1,33	8,22	90	0,09	4,24E-04	8,90E-04	0,00
20	160,3	1,33	8,72	95	0,09	4,27E-04	8,95E-04	0,00
21	160,3	1,33	9,12	100	0,09	4,24E-04	8,90E-04	0,00
22	160,3	1,33	9,43	105	0,09	4,17E-04	8,75E-04	0,00
23	160,3	1,33	9,93	110	0,09	4,19E-04	8,80E-04	0,00
24	160,3	1,33	10,23	115	0,09	4,13E-04	8,67E-04	0,00
25	160,2	1,33	10,63	120	0,09	4,12E-04	8,64E-04	0,00
26	160,2	1,33	11,63	140	0,08	3,86E-04	8,10E-04	0,00
27	160,2	1,33	12,63	150	0,08	3,92E-04	8,22E-04	0,00
28	160,2	1,33	13,24	160	0,08	3,85E-04	8,07E-04	0,00
29	160,2	1,33	13,94	170	0,08	3,81E-04	8,00E-04	0,00
30	160,2	1,33	14,64	180	0,08	3,78E-04	7,94E-04	0,00
31	160,2	1,33	15,14	190	0,08	3,71E-04	7,78E-04	0,00
32	160,1	1,33	15,54	200	0,08	3,61E-04	7,58E-04	0,00
33	160,1	1,33	16,24	210	0,08	3,60E-04	7,55E-04	0,00
34	160,1	1,33	16,95	220	0,08	3,58E-04	7,52E-04	0,00
35	160,1	1,33	17,65	230	0,08	3,57E-04	7,49E-04	0,00
36	160,1	1,33	18,85	240	0,08	3,65E-04	7,67E-04	0,00
37	160,1	1,32	20,05	270	0,07	3,46E-04	7,25E-04	0,00
38	160,0	1,32	21,46	300	0,07	3,33E-04	6,98E-04	0,00
39	160,0	1,32	23,36	330	0,07	3,30E-04	6,91E-04	0,00

Tableau B.12 : Données de l'essai de perméabilité #1 colonne 9-11 (suite)

40	160,0	1,32	24,77	360	0,07	3,20E-04	6,72E-04	0,00
41	160,0	1,32	26,37	390	0,07	3,15E-04	6,61E-04	0,00
42	160,0	1,32	27,87	420	0,07	3,09E-04	6,48E-04	0,00
43	160,0	1,32	29,28	450	0,07	3,03E-04	6,36E-04	0,00
44	159,9	1,32	29,98	480	0,06	2,91E-04	6,10E-04	0,00
45	159,9	1,32	31,38	510	0,06	2,87E-04	6,01E-04	0,00
46	159,9	1,32	32,69	540	0,06	2,82E-04	5,92E-04	0,00
47	159,9	1,32	33,99	570	0,06	2,78E-04	5,83E-04	0,00
48	159,9	1,32	35,49	600	0,06	2,76E-04	5,78E-04	0,00
49	159,9	1,32	36,70	630	0,06	2,71E-04	5,69E-04	0,00
50	159,8	1,32	38,00	660	0,06	2,68E-04	5,63E-04	0,00
51	159,8	1,32	39,31	690	0,06	2,65E-04	5,57E-04	0,00
52	159,8	1,32	40,51	720	0,06	2,62E-04	5,50E-04	0,00
53	159,8	1,32	41,81	750	0,06	2,60E-04	5,45E-04	0,00
54	159,8	1,32	43,12	780	0,06	2,58E-04	5,41E-04	0,00
55	159,8	1,32	44,22	810	0,05	2,55E-04	5,34E-04	0,00
56	159,8	1,32	45,52	840	0,05	2,53E-04	5,30E-04	0,00
57	159,7	1,32	46,62	870	0,05	2,50E-04	5,24E-04	0,00
58	159,7	1,32	47,73	900	0,05	2,47E-04	5,19E-04	0,00
59	159,7	1,32	49,03	930	0,05	2,46E-04	5,16E-04	0,00
60	159,7	1,32	50,23	960	0,05	2,44E-04	5,12E-04	0,00
61	159,7	1,32	51,34	990	0,05	2,42E-04	5,08E-04	0,00
62	159,7	1,32	52,44	1020	0,05	2,40E-04	5,03E-04	0,00
63	159,6	1,32	53,54	1050	0,05	2,38E-04	4,99E-04	0,00
64	159,6	1,32	54,55	1080	0,05	2,36E-04	4,95E-04	0,00
65	159,6	1,32	55,55	1110	0,05	2,34E-04	4,90E-04	0,00

Tableau B.13 : Données de l'essai de perméabilité #1 colonne 9-11 (suite)

Mesures et calculs								
Test no.	Changement de charge (Δh)	Gradient hydraulique (i)	Volume (Q)	Temps (t)	Débit (q)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Porosité pendant l'essai N _{pv}
0	cm		cm ³	s	cm ³ /s	cm/s	cm/s	
66	159,6	1,32	56,55	1140	0,05	2,32E-04	4,86E-04	0,00
67	159,6	1,32	57,85	1170	0,05	2,31E-04	4,84E-04	0,00
68	159,6	1,32	58,76	1200	0,05	2,29E-04	4,80E-04	0,00
69	159,5	1,32	59,76	1230	0,05	2,27E-04	4,76E-04	0,00
70	159,5	1,32	60,86	1260	0,05	2,26E-04	4,73E-04	0,00
71	159,5	1,32	61,87	1290	0,05	2,24E-04	4,70E-04	0,00
72	159,5	1,32	62,87	1320	0,05	2,22E-04	4,67E-04	0,00
73	159,5	1,32	63,37	1350	0,05	2,19E-04	4,60E-04	0,00
74	159,5	1,32	64,47	1380	0,05	2,18E-04	4,58E-04	0,00
75	159,4	1,32	65,48	1410	0,05	2,17E-04	4,55E-04	0,00
76	159,4	1,32	66,38	1440	0,05	2,15E-04	4,52E-04	0,00
77	159,4	1,32	67,38	1470	0,05	2,14E-04	4,49E-04	0,00
78	159,4	1,32	68,38	1500	0,05	2,13E-04	4,47E-04	0,00
79	159,4	1,32	69,39	1530	0,05	2,12E-04	4,45E-04	0,00
80	159,4	1,32	70,39	1560	0,05	2,11E-04	4,42E-04	0,00
81	159,4	1,32	71,39	1590	0,04	2,10E-04	4,40E-04	0,00
82	159,3	1,32	72,39	1620	0,04	2,09E-04	4,38E-04	0,00
83	159,3	1,32	72,89	1650	0,04	2,07E-04	4,33E-04	0,00
84	159,3	1,32	73,90	1680	0,04	2,06E-04	4,32E-04	0,00
85	159,3	1,32	74,80	1710	0,04	2,05E-04	4,29E-04	0,00
86	159,3	1,32	75,90	1740	0,04	2,04E-04	4,28E-04	0,00
87	159,3	1,32	77,01	1770	0,04	2,03E-04	4,27E-04	0,00
88	159,2	1,32	77,71	1800	0,04	2,02E-04	4,24E-04	0,00
89	159,2	1,32	79,51	1860	0,04	2,00E-04	4,20E-04	0,00
90	159,2	1,32	81,32	1920	0,04	1,98E-04	4,16E-04	0,00
91	159,2	1,32	82,92	1980	0,04	1,96E-04	4,11E-04	0,00
92	159,2	1,32	84,63	2040	0,04	1,94E-04	4,07E-04	0,00
93	159,2	1,32	86,33	2100	0,04	1,92E-04	4,04E-04	0,00
94	159,1	1,32	88,14	2160	0,04	1,91E-04	4,01E-04	0,00
95	159,1	1,32	89,84	2220	0,04	1,89E-04	3,97E-04	0,00
96	159,1	1,32	90,64	2280	0,04	1,86E-04	3,91E-04	0,00
97	159,1	1,32	92,15	2340	0,04	1,84E-04	3,87E-04	0,00
98	159,1	1,32	93,85	2400	0,04	1,83E-04	3,84E-04	0,00
99	159,1	1,32	95,96	2470	0,04	1,82E-04	3,82E-04	0,00

Tableau B.14 : Données de l'essai de perméabilité #1 colonne 9-11 (suite)

100	159,0	1,32	97,26	2520	0,04	1,81E-04	3,79E-04	0,00
101	159,0	1,32	98,96	2580	0,04	1,80E-04	3,77E-04	0,00
102	159,0	1,32	100,07	2640	0,04	1,78E-04	3,73E-04	0,00
103	159,0	1,32	101,87	2700	0,04	1,77E-04	3,71E-04	0,00
104	159,0	1,32	103,58	2760	0,04	1,76E-04	3,69E-04	0,00
105	159,0	1,32	105,18	2820	0,04	1,75E-04	3,67E-04	0,00
106	159,0	1,32	106,69	2880	0,04	1,74E-04	3,64E-04	0,00
107	158,9	1,32	108,29	2940	0,04	1,73E-04	3,62E-04	0,00
108	158,9	1,32	112,30	3001	0,04	1,75E-04	3,68E-04	0,00
109	158,9	1,32	113,90	3060	0,04	1,74E-04	3,66E-04	0,00
110	158,9	1,32	115,41	3120	0,04	1,73E-04	3,64E-04	0,00
111	158,9	1,32	116,81	3180	0,04	1,72E-04	3,61E-04	0,00
112	158,9	1,32	117,92	3240	0,04	1,71E-04	3,58E-04	0,00
113	158,8	1,31	119,42	3300	0,04	1,70E-04	3,56E-04	0,00
114	158,8	1,31	120,82	3360	0,04	1,69E-04	3,54E-04	0,00
115	158,8	1,31	122,23	3420	0,04	1,68E-04	3,52E-04	0,00
116	158,8	1,31	123,43	3480	0,04	1,66E-04	3,49E-04	0,00
117	158,8	1,31	124,83	3540	0,04	1,65E-04	3,47E-04	0,00
118	158,8	1,31	126,14	3600	0,04	1,64E-04	3,45E-04	0,00
119	158,7	1,31	127,34	3660	0,03	1,63E-04	3,43E-04	0,00
120	158,7	1,31	128,54	3720	0,03	1,62E-04	3,40E-04	0,00
121	158,7	1,31	129,85	3780	0,03	1,61E-04	3,38E-04	0,00
122	158,7	1,31	130,95	3840	0,03	1,60E-04	3,36E-04	0,00
123	158,7	1,31	132,15	3900	0,03	1,59E-04	3,34E-04	0,00
124	158,7	1,31	133,36	3960	0,03	1,58E-04	3,32E-04	0,00
125	158,6	1,31	134,46	4020	0,03	1,57E-04	3,30E-04	0,00
126	158,6	1,31	135,56	4080	0,03	1,56E-04	3,27E-04	0,00
127	158,6	1,31	136,57	4140	0,03	1,55E-04	3,25E-04	0,00
128	158,6	1,31	137,67	4200	0,03	1,54E-04	3,23E-04	0,00
129	158,6	1,31	138,87	4260	0,03	1,53E-04	3,21E-04	0,00
130	158,6	1,31	139,87	4320	0,03	1,52E-04	3,19E-04	0,00

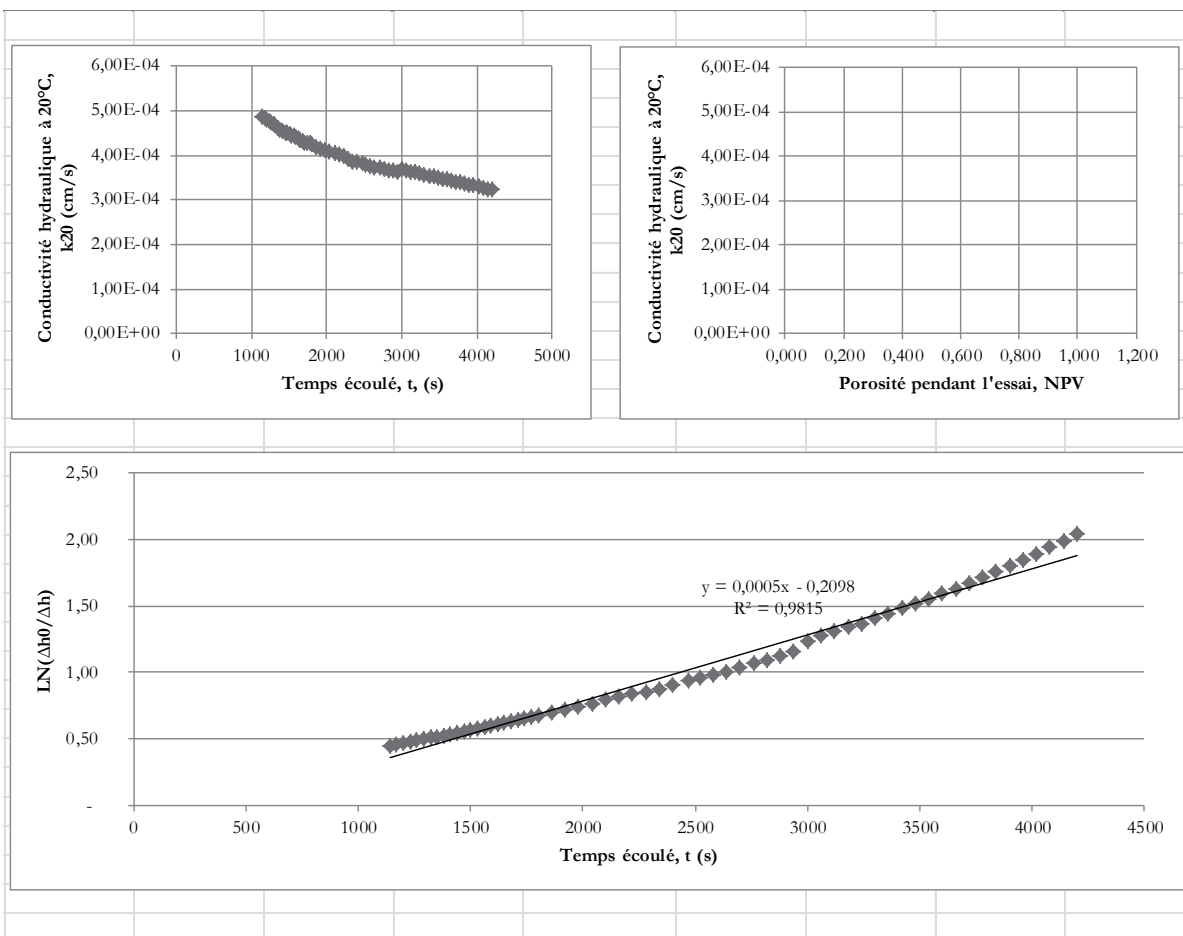


Figure B.1 : Graphiques des résultats de l'essai de perméabilité #1 colonne 9-11

Tableau B.15 : Données essais de perméabilité #2 colonne 9-11 (CRE-B)

Conductivité hydraulique à charge constante des roches stériles					
Mine Tio - 0-10mm tamisé					
Échantillon reçu été 2013					
Information générale					
Testé par:	Isabelle Lévesque, Jérôme Goyer, Stéphanie Letourneur				
Laboratoire IRME					
Date testé:	16-juil-14 Essai 2				
Projet:	Colonne 9-11 pour déterminer la courbe de rétention d'eau (CRE-B)				
Détails du test					
Diamètre max. particules				10 mm	
Diamètre du moule, D			14,4	cm	
Masse cellule vide et connections, M ₁			31 917,5	g	
Masse cellule eau désaéré et connections, M _e			51 816,1	g	
Masse cellule sol, air, connections, M ₂			76 301,3	g	
Masse cellule sol, eau, air, connections, M _{tot}			77 598,6	g	
Masse sol humide, M _{ms}			45 321,8	g	
Masse sèche du sol, M _s			43 164,0	g	
Masse eau, M _{win}			2 157,8	g	
Masse eau, M _{wf}			2 057,8	g	
Teneur en eau massique initiale, w _{in}			5,0	%	
Teneur en eau massique finale, w _f			4,8	%	
Densité relative du sol, G _s			2,745		
Indice des vides, e			0,305		
Porosité initial, n			0,234		
Volume des vides, V _v			3 824,9	cm ³	
Volume des pores, V _p			4 575,5	cm ³	
Volume eau, V _w			2 163,5	cm ³	
Niveau de saturation			57	%	
Aire de l'échantillon, A			162,18	cm ²	
Longueur de l'échantillon, L _f			120,80	cm	
Volume total, V _t			19 591,62	cm ³	
Aire du réservoir intrant, a _{in}			0,21	cm ²	
Aire du réservoir extrant, a _{out}			0,21	cm ²	
Température eau, T			23,9	°C	
Densité sèche initial, ρ _{di}			2,10	g/cm ³	
Densité sèche finale, ρ _{df}			2,10	g/cm ³	
Densité de l'eau, ρ _w			0,997	g/cm ³	
Facteur de correction, R _T à 20°C			0,896		
Précision de la balance utilisée:			200 g		
Méthode de préparation de l'échantillon:					
Moyenne k20 2,5E-04 cm/s					
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard					
Selon la procédure standard ASTM D5856-95(2002), le gradient hydraulique maximal recommandé est de 2 pour un sol dont la conductivité hydraulique prédite est à plus de 10 ⁻⁴ cm/s.					

Tableau B.16 : Mesures essai de perméabilité #2 colonne 9-11 (CRE-B)

Mesures et calculs								
Test no.	Changement de charge (Δh)	Gradient hydraulique (i)	Volume (Q)	Temps (t)	Débit (q)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Porosité pendant l'essai N _{PV}
0	cm		cm ³	s	cm ³ /s	cm/s	cm/s	
1	149,3	1,24	-	-				
2	149,3	1,24	0,10	5,00	0,02	1,00E-04	2,10E-04	0,00
3	149,3	1,24	0,10	10,00	0,01	5,00E-05	1,05E-04	-
4	149,3	1,24	0,20	15,00	0,01	6,67E-05	1,40E-04	0,00
5	149,3	1,24	0,40	20,00	0,02	1,00E-04	2,10E-04	0,00
6	149,3	1,24	0,40	25,00	0,02	8,00E-05	1,68E-04	-
7	149,3	1,24	0,50	30,00	0,02	8,34E-05	1,75E-04	0,00
8	149,3	1,24	0,50	35,00	0,01	7,15E-05	1,50E-04	-
9	149,3	1,24	1,20	40,00	0,03	1,50E-04	3,16E-04	0,00
10	149,3	1,24	1,30	45,00	0,03	1,45E-04	3,04E-04	0,00
11	149,3	1,24	1,40	50,00	0,03	1,40E-04	2,95E-04	0,00
12	149,3	1,24	1,50	55,00	0,03	1,36E-04	2,87E-04	0,00
13	149,3	1,24	1,60	60,00	0,03	1,33E-04	2,81E-04	0,00
14	149,3	1,24	1,80	65,00	0,03	1,39E-04	2,91E-04	0,00
15	149,3	1,24	1,91	70,00	0,03	1,36E-04	2,86E-04	0,00
16	149,3	1,24	2,01	75,00	0,03	1,33E-04	2,81E-04	0,00
17	149,3	1,24	2,21	80,00	0,03	1,38E-04	2,89E-04	0,00
18	149,3	1,24	2,21	85,00	0,03	1,29E-04	2,72E-04	-
19	149,3	1,24	2,41	90,00	0,03	1,33E-04	2,81E-04	0,00
20	149,3	1,24	2,51	95,00	0,03	1,32E-04	2,77E-04	0,00
21	149,3	1,24	2,61	100,00	0,03	1,30E-04	2,74E-04	0,00
22	149,3	1,24	2,71	105,00	0,03	1,29E-04	2,70E-04	0,00
23	149,3	1,24	2,91	110,00	0,03	1,32E-04	2,77E-04	0,00
24	149,3	1,24	3,01	115,00	0,03	1,30E-04	2,74E-04	0,00
25	149,3	1,24	3,21	120,00	0,03	1,33E-04	2,81E-04	0,00
26	149,3	1,24	3,41	130,00	0,03	1,31E-04	2,75E-04	0,00
27	149,3	1,24	3,61	140,00	0,03	1,29E-04	2,70E-04	0,00
28	149,3	1,24	4,01	150,00	0,03	1,33E-04	2,81E-04	0,00
29	149,3	1,24	4,21	160,00	0,03	1,31E-04	2,76E-04	0,00
30	149,3	1,24	4,41	170,00	0,03	1,29E-04	2,72E-04	0,00
31	149,3	1,24	4,61	180,00	0,03	1,28E-04	2,69E-04	0,00
33	149,3	1,24	5,11	200,00	0,03	1,28E-04	2,68E-04	0,00
34	149,3	1,24	5,41	210,00	0,03	1,29E-04	2,70E-04	0,00
35	149,3	1,24	5,72	220,00	0,03	1,30E-04	2,73E-04	0,00
36	149,3	1,24	5,92	230,00	0,03	1,28E-04	2,70E-04	0,00
37	149,3	1,24	6,12	240,00	0,03	1,27E-04	2,67E-04	0,00
38	149,3	1,24	6,92	270,00	0,03	1,28E-04	2,69E-04	0,00
39	149,3	1,24	7,72	300,00	0,03	1,28E-04	2,70E-04	0,00

Tableau B.17 : Mesures essai de perméabilité #2 colonne 9-11 (CRE-B) (suite)

Mesures et calculs								
Test no.	Changement de charge (Δh)	Gradient hydraulique (i)	Volume (Q)	Temps (t)	Débit (q)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Porosité pendant l'essai N _{PV}
0	cm		cm ³	s	cm ³ /s	cm/s	cm/s	
40	149,3	1,24	8,42	330,00	0,03	1,27E-04	2,68E-04	0,00
41	149,3	1,24	9,12	360,00	0,03	1,26E-04	2,66E-04	0,00
42	149,3	1,24	9,83	390,00	0,03	1,26E-04	2,64E-04	0,00
43	149,3	1,24	10,63	420,00	0,03	1,26E-04	2,65E-04	0,00
44	149,3	1,24	11,13	450,00	0,02	1,23E-04	2,59E-04	0,00
45	149,3	1,24	11,73	480,00	0,02	1,22E-04	2,56E-04	0,00
46	149,3	1,24	12,53	510,00	0,02	1,23E-04	2,58E-04	0,00
47	149,3	1,24	13,24	540,00	0,02	1,22E-04	2,57E-04	0,00
48	149,3	1,24	13,94	570,00	0,02	1,22E-04	2,57E-04	0,00
49	149,3	1,24	14,64	600,00	0,02	1,22E-04	2,56E-04	0,00
50	149,3	1,24	15,94	660,00	0,02	1,21E-04	2,53E-04	0,00
51	149,3	1,24	17,35	720,00	0,02	1,20E-04	2,53E-04	0,00
52	149,3	1,24	18,75	780,00	0,02	1,20E-04	2,52E-04	0,00
53	149,3	1,24	19,85	840,00	0,02	1,18E-04	2,48E-04	0,00
54	149,3	1,24	21,26	900,00	0,02	1,18E-04	2,48E-04	0,00
55	149,3	1,24	22,46	960,00	0,02	1,17E-04	2,45E-04	0,00
56	149,3	1,24	23,86	1 020,00	0,02	1,17E-04	2,45E-04	0,00
57	149,3	1,24	25,17	1 080,00	0,02	1,16E-04	2,44E-04	0,00
58	149,3	1,24	26,57	1 140,00	0,02	1,16E-04	2,45E-04	0,00
59	149,3	1,24	27,87	1 200,00	0,02	1,16E-04	2,44E-04	0,00
60	149,3	1,24	29,08	1 260,00	0,02	1,15E-04	2,42E-04	0,00
61	149,3	1,24	30,38	1 320,00	0,02	1,15E-04	2,41E-04	0,00
62	149,3	1,24	31,68	1 380,00	0,02	1,15E-04	2,41E-04	0,00
63	149,3	1,24	32,99	1 440,00	0,02	1,14E-04	2,40E-04	0,00
64	149,3	1,24	34,29	1 500,00	0,02	1,14E-04	2,40E-04	0,00
65	149,3	1,24	35,49	1 560,00	0,02	1,14E-04	2,39E-04	0,00
66	149,3	1,24	36,80	1 620,00	0,02	1,13E-04	2,38E-04	0,00
67	149,3	1,24	37,90	1 680,00	0,02	1,13E-04	2,37E-04	0,00
68	149,3	1,24	39,20	1 740,00	0,02	1,12E-04	2,36E-04	0,00
69	149,3	1,24	40,51	1 800,00	0,02	1,12E-04	2,36E-04	0,00
70	149,3	1,24	41,71	1 860,00	0,02	1,12E-04	2,35E-04	0,00
71	149,3	1,24	42,91	1 920,00	0,02	1,12E-04	2,34E-04	0,00
72	149,3	1,24	44,22	1 980,00	0,02	1,11E-04	2,34E-04	0,00
73	149,3	1,24	45,22	2 040,00	0,02	1,11E-04	2,33E-04	0,00
74	149,3	1,24	46,62	2 100,00	0,02	1,11E-04	2,33E-04	0,00
75	149,3	1,24	47,63	2 160,00	0,02	1,10E-04	2,31E-04	0,00
76	149,3	1,24	48,93	2 220,00	0,02	1,10E-04	2,31E-04	0,00
77	149,3	1,24	50,03	2 280,00	0,02	1,09E-04	2,30E-04	0,00
78	149,3	1,24	51,24	2 340,00	0,02	1,09E-04	2,30E-04	0,00
79	149,3	1,24	52,34	2 400,00	0,02	1,09E-04	2,29E-04	0,00

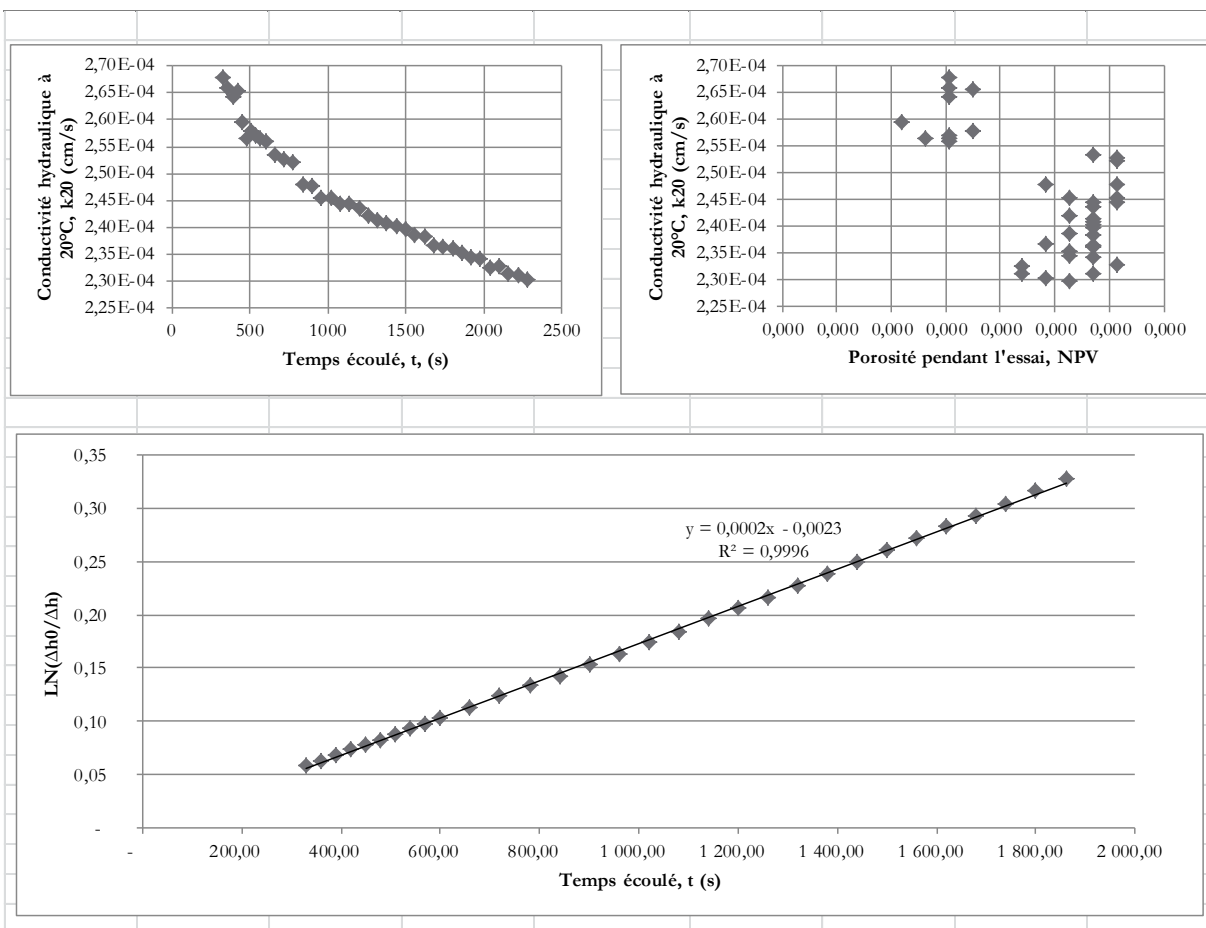


Figure B.2 : Graphique des résultats de l'essai de perméabilité #2 colonne 9-11 (CRE-B)

Tableau B.18 : Données de montage de l'essai de perméabilité #3 colonne 9-11

Conductivité hydraulique à charge constante des roches stériles					
Mine Tio - 0-10mm tamisé					
Échantillon reçu été 2013					
Information générale					
Testé par:	Isabelle Lévesque, Jérôme Goyer, Stéphanie Letourneur				
Laboratoire IRME					
Date testé:	18-juil-14 Essai 3				
Projet:	Colonne 5-6 pour déterminer la courbe de rétention d'eau (CRE-A)				
Détails du test					
Diamètre max. particules				10 mm	
Diamètre du moule, D			14,4	cm	
Masse cellule vide et connections, M ₁			29 801,6	g	
Masse cellule eau désaéré et connections, M _e			49 699,6	g	
Masse cellule sol, air, connections, M ₂			74 801,6	g	
Masse cellule sol, eau, air, connections, M _{tot}			77 099,3	g	
Masse sol humide, M _{ms}			46 863,8	g	
Masse sèche du sol, M _s			41 896,0	g	
Masse eau, M _{win}			4 967,8	g	
Masse eau, M _{wf}			4 967,8	g	
Teneur en eau massique initiale, w _{in}			11,9	%	
Teneur en eau massique finale, w _f			11,9	%	
Densité relative du sol, G _s			2,745		
Indice des vides, e			0,426		
Porosité initial, n			0,299		
Volume des vides, V _v			4 212,6	cm ³	
Volume des pores, V _p			5 834,8	cm ³	
Volume eau, V _w			4 981,0	cm ³	
Niveau de saturation			118	%	
Aire de l'échantillon, A			161,96	cm ²	
Longueur de l'échantillon, L _f			120,50	cm	
Volume total, V _t			19 515,78	cm ³	
Aire du réservoir intrant, a _{in}			0,21	cm ²	
Aire du réservoir extrant, a _{out}			0,21	cm ²	
Température eau, T			23,8	°C	
Densité sèche initial, ρ _{di}			1,92	g/cm ³	
Densité sèche finale, ρ _{df}			1,92	g/cm ³	
Densité de l'eau, ρ _w			0,997	g/cm ³	
Facteur de correction, R _T à 20°C			0,899		
Précision de la balance utilisée:			200 g		
Méthode de préparation de l'échantillon:					
Moyenne k20		1,5E-04 cm/s			
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard					
Selon la procédure standard ASTM D5856-95(2002), le gradient hydraulique maximal recommandé est de 2 pour un sol dont la conductivité hydraulique prédite est à plus de 10 ⁻⁴ cm/s.					

Tableau B.19 : Mesures de l'essai de perméabilité #3 colonne 9-11

Mesures et calculs								
Test no.	Changement de charge (Δh)	Gradient hydraulique (i)	Volume (Q)	Temps (t)	Débit (q)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Porosité pendant l'essai N _{pv}
0	cm		cm ³	s	cm ³ /s	cm/s	cm/s	
1	150,6	1,25	-	-				
2	150,6	1,25	-	5,00	-	0,00E+00	0,00E+00	-
3	150,6	1,25	-	10,00	-	0,00E+00	0,00E+00	-
4	150,6	1,25	-	15,00	-	0,00E+00	0,00E+00	-
5	150,6	1,25	0,10	20,00	0,01	2,48E-05	4,75E-05	0,00
6	150,6	1,25	0,10	25,00	0,00	1,98E-05	3,80E-05	-
7	150,6	1,25	0,20	30,00	0,01	3,30E-05	6,34E-05	0,00
8	150,6	1,25	0,20	35,00	0,01	2,83E-05	5,43E-05	-
9	150,6	1,25	0,40	40,00	0,01	4,95E-05	9,51E-05	0,00
10	150,6	1,25	0,50	45,00	0,01	5,50E-05	1,06E-04	0,00
11	150,6	1,25	0,60	50,00	0,01	5,94E-05	1,14E-04	0,00
12	150,6	1,25	0,70	55,00	0,01	6,30E-05	1,21E-04	0,00
13	150,6	1,25	0,70	60,00	0,01	5,78E-05	1,11E-04	-
14	150,6	1,25	0,80	65,00	0,01	6,10E-05	1,17E-04	0,00
15	150,6	1,25	0,80	70,00	0,01	5,66E-05	1,09E-04	-
16	150,6	1,25	0,90	75,00	0,01	5,94E-05	1,14E-04	0,00
17	150,6	1,25	1,00	80,00	0,01	6,19E-05	1,19E-04	0,00
18	150,6	1,25	1,00	85,00	0,01	5,83E-05	1,12E-04	-
19	150,6	1,25	1,20	90,00	0,01	6,60E-05	1,27E-04	0,00
20	150,6	1,25	1,40	95,00	0,01	7,30E-05	1,40E-04	0,00
21	150,6	1,25	1,40	100,00	0,01	6,93E-05	1,33E-04	-
22	150,6	1,25	1,50	105,00	0,01	7,08E-05	1,36E-04	0,00
23	150,6	1,25	1,50	110,00	0,01	6,75E-05	1,30E-04	-
24	150,6	1,25	1,60	115,00	0,01	6,89E-05	1,32E-04	0,00
25	150,6	1,25	1,70	120,00	0,01	7,02E-05	1,35E-04	0,00
26	150,6	1,25	1,91	130,00	0,01	7,24E-05	1,39E-04	0,00
27	150,6	1,25	2,21	140,00	0,02	7,78E-05	1,49E-04	0,00
28	150,6	1,25	2,31	150,00	0,02	7,60E-05	1,46E-04	0,00
29	150,6	1,25	2,41	160,00	0,02	7,43E-05	1,43E-04	0,00
30	150,6	1,25	2,61	170,00	0,02	7,58E-05	1,45E-04	0,00
31	150,6	1,25	2,71	180,00	0,02	7,43E-05	1,43E-04	0,00
33	150,6	1,25	2,91	200,00	0,01	7,18E-05	1,38E-04	0,00
34	150,6	1,25	3,21	210,00	0,02	7,55E-05	1,45E-04	0,00
35	150,6	1,25	3,51	220,00	0,02	7,88E-05	1,51E-04	0,00
36	150,6	1,25	3,61	230,00	0,02	7,75E-05	1,49E-04	0,00
37	150,6	1,25	3,71	240,00	0,02	7,64E-05	1,47E-04	0,00
38	150,6	1,25	4,21	270,00	0,02	7,71E-05	1,48E-04	0,00
39	150,6	1,25	4,61	300,00	0,02	7,60E-05	1,46E-04	0,00

Tableau B.20 : Mesures de l'essai de perméabilité #3 colonne 9-11 (suite)

Mesures et calculs								
Test no.	Changement de charge (Δh)	Gradient hydraulique (i)	Volume (Q)	Temps (t)	Débit (q)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Porosité pendant l'essai N_{pv}
0	cm		cm ³	s	cm ³ /s	cm/s	cm/s	
40	150,6	1,25	5,31	330,00	0,02	7,96E-05	1,53E-04	0,00
41	150,6	1,25	5,72	360,00	0,02	7,84E-05	1,51E-04	0,00
42	150,6	1,25	6,22	390,00	0,02	7,87E-05	1,51E-04	0,00
43	150,6	1,25	6,62	420,00	0,02	7,78E-05	1,49E-04	0,00
44	150,6	1,25	7,12	450,00	0,02	7,82E-05	1,50E-04	0,00
45	150,6	1,25	7,72	480,00	0,02	7,95E-05	1,53E-04	0,00
46	150,6	1,25	8,12	510,00	0,02	7,87E-05	1,51E-04	0,00
47	150,6	1,25	8,62	540,00	0,02	7,89E-05	1,51E-04	0,00
48	150,6	1,25	9,32	570,00	0,02	8,08E-05	1,55E-04	0,00
49	150,6	1,25	9,73	600,00	0,02	8,01E-05	1,54E-04	0,00
50	150,6	1,25	10,53	660,00	0,02	7,88E-05	1,51E-04	0,00
51	150,6	1,25	11,53	720,00	0,02	7,91E-05	1,52E-04	0,00
52	150,6	1,25	12,53	780,00	0,02	7,94E-05	1,52E-04	0,00
53	150,6	1,25	13,54	840,00	0,02	7,96E-05	1,53E-04	0,00
54	150,6	1,25	14,44	900,00	0,02	7,93E-05	1,52E-04	0,00
55	150,6	1,25	15,64	960,00	0,02	8,05E-05	1,54E-04	0,00
56	150,6	1,25	16,54	1 020,00	0,02	8,01E-05	1,54E-04	0,00
57	150,6	1,25	17,55	1 080,00	0,02	8,03E-05	1,54E-04	0,00
58	150,6	1,25	18,55	1 140,00	0,02	8,04E-05	1,54E-04	0,00
59	150,6	1,25	19,45	1 200,00	0,02	8,01E-05	1,54E-04	0,00
60	150,6	1,25	20,45	1 260,00	0,02	8,02E-05	1,54E-04	0,00
61	150,6	1,25	21,46	1 320,00	0,02	8,03E-05	1,54E-04	0,00
62	150,6	1,25	22,46	1 380,00	0,02	8,04E-05	1,54E-04	0,00
63	150,6	1,25	23,46	1 440,00	0,02	8,05E-05	1,54E-04	0,00
64	150,6	1,25	24,46	1 500,00	0,02	8,06E-05	1,55E-04	0,00
65	150,6	1,25	25,47	1 560,00	0,02	8,07E-05	1,55E-04	0,00
66	150,6	1,25	26,47	1 620,00	0,02	8,07E-05	1,55E-04	0,00
67	150,6	1,25	27,47	1 680,00	0,02	8,08E-05	1,55E-04	0,00
68	150,6	1,25	28,48	1 740,00	0,02	8,09E-05	1,55E-04	0,00
69	150,6	1,25	29,68	1 800,00	0,02	8,15E-05	1,56E-04	0,00
70	150,6	1,25	30,38	1 860,00	0,02	8,07E-05	1,55E-04	0,00
71	150,6	1,25	31,28	1 920,00	0,02	8,05E-05	1,54E-04	0,00
72	150,6	1,25	31,38	1 980,00	0,02	7,83E-05	1,50E-04	0,00
73	150,6	1,25	33,19	2 040,00	0,02	8,04E-05	1,54E-04	0,00
74	150,6	1,25	34,09	2 100,00	0,02	8,02E-05	1,54E-04	0,00
75	150,6	1,25	35,09	2 160,00	0,02	8,03E-05	1,54E-04	0,00
76	150,6	1,25	36,10	2 220,00	0,02	8,03E-05	1,54E-04	0,00
77	150,6	1,25	37,00	2 280,00	0,02	8,02E-05	1,54E-04	0,00
78	150,6	1,25	37,80	2 340,00	0,02	7,98E-05	1,53E-04	0,00
79	150,6	1,25	38,80	2 400,00	0,02	7,99E-05	1,53E-04	0,00

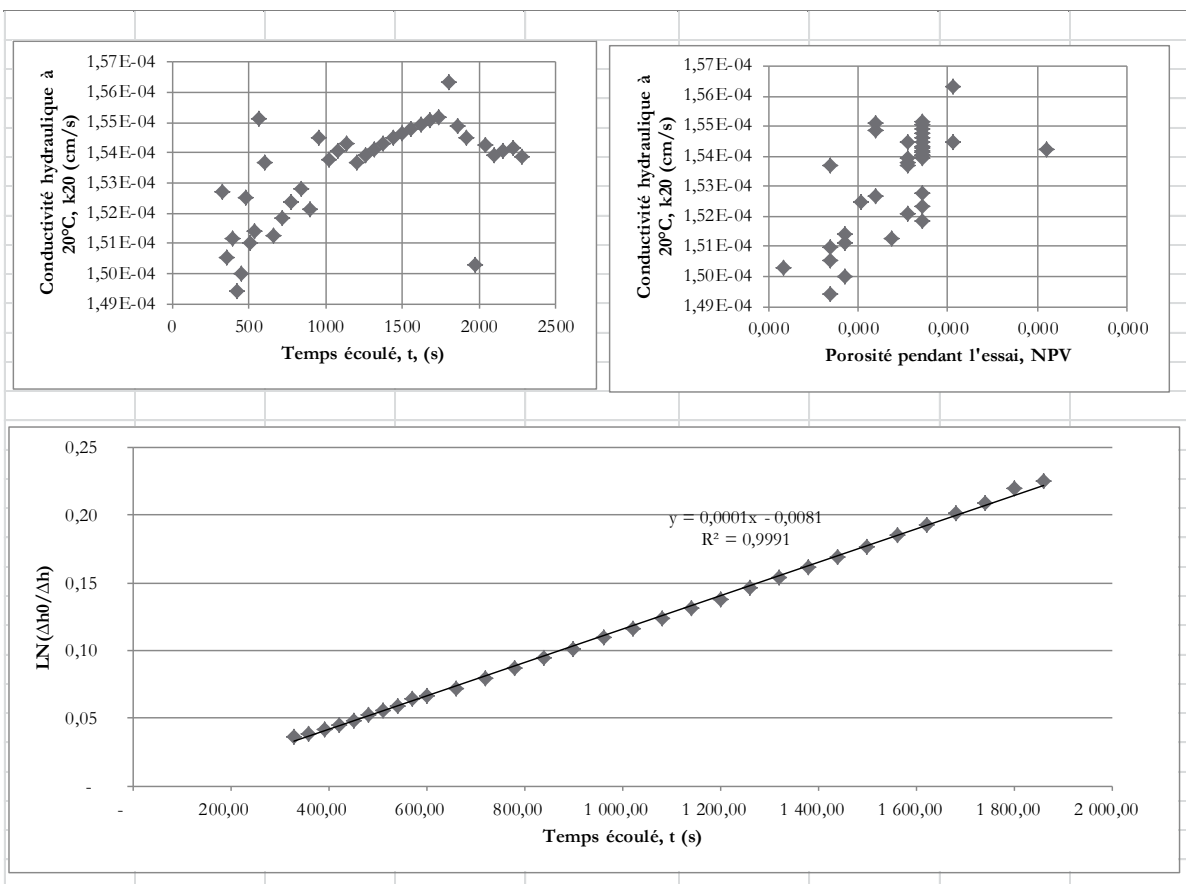


Figure B.3 : Graphique des résultats de l'essai de perméabilité #3 colonne 9-11

Tableau B.21 : Données de montage de de l'essai de perméabilité #4 colonne 5-6

Conductivité hydraulique à charge constante des roches stériles									
Mine Tio - 0-10mm tamisé									
Échantillon reçu été 2013									
Information générale									
Testé par:		Isabelle Lévesque, Jérôme Goyer, Stéphanie Letourneur							
Laboratoire IRME									
Date testé:		18-juil-14 Essai 4							
Projet:		Colonne 5-6 pour déterminer la courbe de rétention d'eau (CRE-A)							
Détails du test									
Diamètre max. particules		10 mm							
Diamètre du moule, D		14,4 cm							
Masse cellule vide et connections, M ₁		29 801,6 g							
Masse cellule eau désaéré et connections, M _e		49 699,6 g							
Masse cellule sol, air, connections, M ₂		74 801,6 g							
Masse cellule sol, eau, air, connections, M _{tot}		77 099,3 g							
Masse sol humide, M _{ms}		46 863,8 g							
Masse sèche du sol, M _s		41 896,0 g							
Masse eau, M _{win}		4 967,8 g							
Masse eau, M _{wf}		4 967,8 g							
Teneur en eau massique initiale, w _{in}		11,9 ‰							
Teneur en eau massique finale, w _f		11,9 ‰							
Densité relative du sol, G _s		2,745							
Indice des vides, e		0,426							
Porosité initial, n		0,299							
Volume des vides, V _v		4 212,6 cm ³							
Volume des pores, V _p		5 834,8 cm ³							
Volume eau, V _w		4 981,0 cm ³							
Niveau de saturation		118 ‰							
Aire de l'échantillon, A		161,96 cm ²							
Longueur de l'échantillon, L _f		120,50 cm							
Volume total, V _t		19 515,78 cm ³							
Aire du réservoir intrant, a _{in}		0,21 cm ²							
Aire du réservoir extrant, a _{out}		0,21 cm ²							
Température eau, T		23,8 °C							
Densité sèche initial, ρ _{di}		1,92 g/cm ³							
Densité sèche finale, ρ _{df}		1,92 g/cm ³							
Densité de l'eau, ρ _w		0,997 g/cm ³							
Facteur de correction, R _T à 20°C		0,899							
Précision de la balance utilisée:		200 g							
Méthode de préparation de l'échantillon:									
Moyenne k20		1,4E-04 cm/s							
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard									
Selon la procédure standard ASTM D5856-95(2002), le gradient hydraulique maximal recommandé est de 2 pour un sol dont la conductivité hydraulique prédite est à plus de 10 ⁻⁴ cm/s.									

Tableau B.22 : Mesures de l'essai de perméabilité #4 colonne 5-6

Mesures et calculs								
Test no.	Changement de charge (Δh)	Gradient hydraulique (i)	Volume (Q)	Temps (t)	Débit (q)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Porosité pendant l'essai N_{pv}
0	cm		cm ³	s	cm ³ /s	cm/s	cm/s	
1	151,2	1,25	-	-				
2	151,2	1,25	-	5,00	-	0,00E+00	0,00E+00	-
3	151,2	1,25	-	10,00	-	0,00E+00	0,00E+00	-
4	151,2	1,25	-	15,00	-	0,00E+00	0,00E+00	-
5	151,2	1,25	0,10	20,00	0,01	2,47E-05	4,73E-05	0,00
6	151,2	1,25	0,20	25,00	0,01	3,95E-05	7,58E-05	0,00
7	151,2	1,25	0,30	30,00	0,01	4,93E-05	9,47E-05	0,00
8	151,2	1,25	0,30	35,00	0,01	4,23E-05	8,12E-05	-
9	151,2	1,25	0,40	40,00	0,01	4,93E-05	9,47E-05	0,00
10	151,2	1,25	0,60	45,00	0,01	6,58E-05	1,26E-04	0,00
11	151,2	1,25	0,70	50,00	0,01	6,91E-05	1,33E-04	0,00
12	151,2	1,25	0,80	55,00	0,01	7,18E-05	1,38E-04	0,00
13	151,2	1,25	0,80	60,00	0,01	6,58E-05	1,26E-04	-
14	151,2	1,25	0,90	65,00	0,01	6,83E-05	1,31E-04	0,00
15	151,2	1,25	0,90	70,00	0,01	6,34E-05	1,22E-04	-
16	151,2	1,25	1,00	75,00	0,01	6,58E-05	1,26E-04	0,00
17	151,2	1,25	1,10	80,00	0,01	6,78E-05	1,30E-04	0,00
18	151,2	1,25	1,20	85,00	0,01	6,97E-05	1,34E-04	0,00
19	151,2	1,25	1,20	90,00	0,01	6,58E-05	1,26E-04	-
20	151,2	1,25	1,50	95,00	0,02	7,79E-05	1,50E-04	0,00
21	151,2	1,25	1,60	100,00	0,02	7,89E-05	1,52E-04	0,00
22	151,2	1,25	1,60	105,00	0,02	7,52E-05	1,44E-04	-
23	151,2	1,25	1,70	110,00	0,02	7,63E-05	1,46E-04	0,00
24	151,2	1,25	1,80	115,00	0,02	7,72E-05	1,48E-04	0,00
25	151,2	1,25	1,80	120,00	0,02	7,40E-05	1,42E-04	-
26	151,2	1,25	2,01	130,00	0,02	7,59E-05	1,46E-04	0,00
27	151,2	1,25	2,11	140,00	0,02	7,40E-05	1,42E-04	0,00
28	151,2	1,25	2,41	150,00	0,02	7,89E-05	1,52E-04	0,00
29	151,2	1,25	2,51	160,00	0,02	7,71E-05	1,48E-04	0,00
30	151,2	1,25	2,71	170,00	0,02	7,84E-05	1,50E-04	0,00
31	151,2	1,25	2,81	180,00	0,02	7,67E-05	1,47E-04	0,00
33	151,2	1,25	3,11	200,00	0,02	7,65E-05	1,47E-04	0,00
34	151,2	1,25	3,31	210,00	0,02	7,75E-05	1,49E-04	0,00
35	151,2	1,25	3,51	220,00	0,02	7,85E-05	1,51E-04	0,00
36	151,2	1,25	3,61	230,00	0,02	7,72E-05	1,48E-04	0,00
37	151,2	1,25	3,71	240,00	0,02	7,61E-05	1,46E-04	0,00
38	151,2	1,25	4,31	270,00	0,02	7,86E-05	1,51E-04	0,00
39	151,2	1,25	4,71	300,00	0,02	7,73E-05	1,48E-04	0,00

Tableau B.23 : Mesures de l'essai de perméabilité #4 colonne 5-6 (suite)

Mesures et calculs								
Test no.	Changement de charge (Δh)	Gradient hydraulique (i)	Volume (Q)	Temps (t)	Débit (q)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Porosité pendant l'essai N _{PV}
0	cm		cm ³	s	cm ³ /s	cm/s	cm/s	
40	151,2	1,25	5,21	330,00	0,02	7,77E-05	1,49E-04	0,00
41	151,2	1,25	5,61	360,00	0,02	7,67E-05	1,47E-04	0,00
42	151,2	1,25	6,12	390,00	0,02	7,72E-05	1,48E-04	0,00
43	151,2	1,25	6,62	420,00	0,02	7,75E-05	1,49E-04	0,00
44	151,2	1,25	7,02	450,00	0,02	7,67E-05	1,47E-04	0,00
45	151,2	1,25	7,62	480,00	0,02	7,81E-05	1,50E-04	0,00
46	151,2	1,25	7,92	510,00	0,02	7,64E-05	1,47E-04	0,00
47	151,2	1,25	8,32	540,00	0,02	7,58E-05	1,46E-04	0,00
48	151,2	1,25	8,82	570,00	0,02	7,62E-05	1,46E-04	0,00
49	151,2	1,25	9,42	600,00	0,02	7,73E-05	1,48E-04	0,00
50	151,2	1,25	10,13	660,00	0,02	7,55E-05	1,45E-04	0,00
51	151,2	1,25	11,03	720,00	0,02	7,54E-05	1,45E-04	0,00
52	151,2	1,25	11,93	780,00	0,02	7,53E-05	1,44E-04	0,00
53	151,2	1,25	12,83	840,00	0,02	7,52E-05	1,44E-04	0,00
54	151,2	1,25	13,74	900,00	0,02	7,51E-05	1,44E-04	0,00
55	151,2	1,25	14,64	960,00	0,02	7,50E-05	1,44E-04	0,00
56	151,2	1,25	15,54	1 020,00	0,02	7,50E-05	1,44E-04	0,00
57	151,2	1,25	16,34	1 080,00	0,02	7,45E-05	1,43E-04	0,00
58	151,2	1,25	17,25	1 140,00	0,02	7,44E-05	1,43E-04	0,00
59	151,2	1,25	18,05	1 200,00	0,02	7,40E-05	1,42E-04	0,00
60	151,2	1,25	18,95	1 260,00	0,02	7,40E-05	1,42E-04	0,00
61	151,2	1,25	19,75	1 320,00	0,01	7,36E-05	1,41E-04	0,00
62	151,2	1,25	20,65	1 380,00	0,01	7,37E-05	1,41E-04	0,00
63	151,2	1,25	21,36	1 440,00	0,01	7,30E-05	1,40E-04	0,00
64	151,2	1,25	22,36	1 500,00	0,01	7,34E-05	1,41E-04	0,00
65	151,2	1,25	23,16	1 560,00	0,01	7,31E-05	1,40E-04	0,00
66	151,2	1,25	24,16	1 620,00	0,01	7,34E-05	1,41E-04	0,00
67	151,2	1,25	24,97	1 680,00	0,01	7,31E-05	1,40E-04	0,00
68	151,2	1,25	25,77	1 740,00	0,01	7,29E-05	1,40E-04	0,00
69	151,2	1,25	26,47	1 800,00	0,01	7,24E-05	1,39E-04	0,00
70	151,2	1,25	27,47	1 860,00	0,01	7,27E-05	1,39E-04	0,00
71	151,2	1,25	28,38	1 920,00	0,01	7,27E-05	1,40E-04	0,00
72	151,2	1,25	29,08	1 980,00	0,01	7,23E-05	1,39E-04	0,00
73	151,2	1,25	29,98	2 040,00	0,01	7,23E-05	1,39E-04	0,00
74	151,2	1,25	30,88	2 100,00	0,01	7,24E-05	1,39E-04	0,00
75	151,2	1,25	31,78	2 160,00	0,01	7,24E-05	1,39E-04	0,00
76	151,2	1,25	32,49	2 220,00	0,01	7,20E-05	1,38E-04	0,00
77	151,2	1,25	33,39	2 280,00	0,01	7,21E-05	1,38E-04	0,00
78	151,2	1,25	34,19	2 340,00	0,01	7,19E-05	1,38E-04	0,00
79	151,2	1,25	35,09	2 400,00	0,01	7,20E-05	1,38E-04	0,00

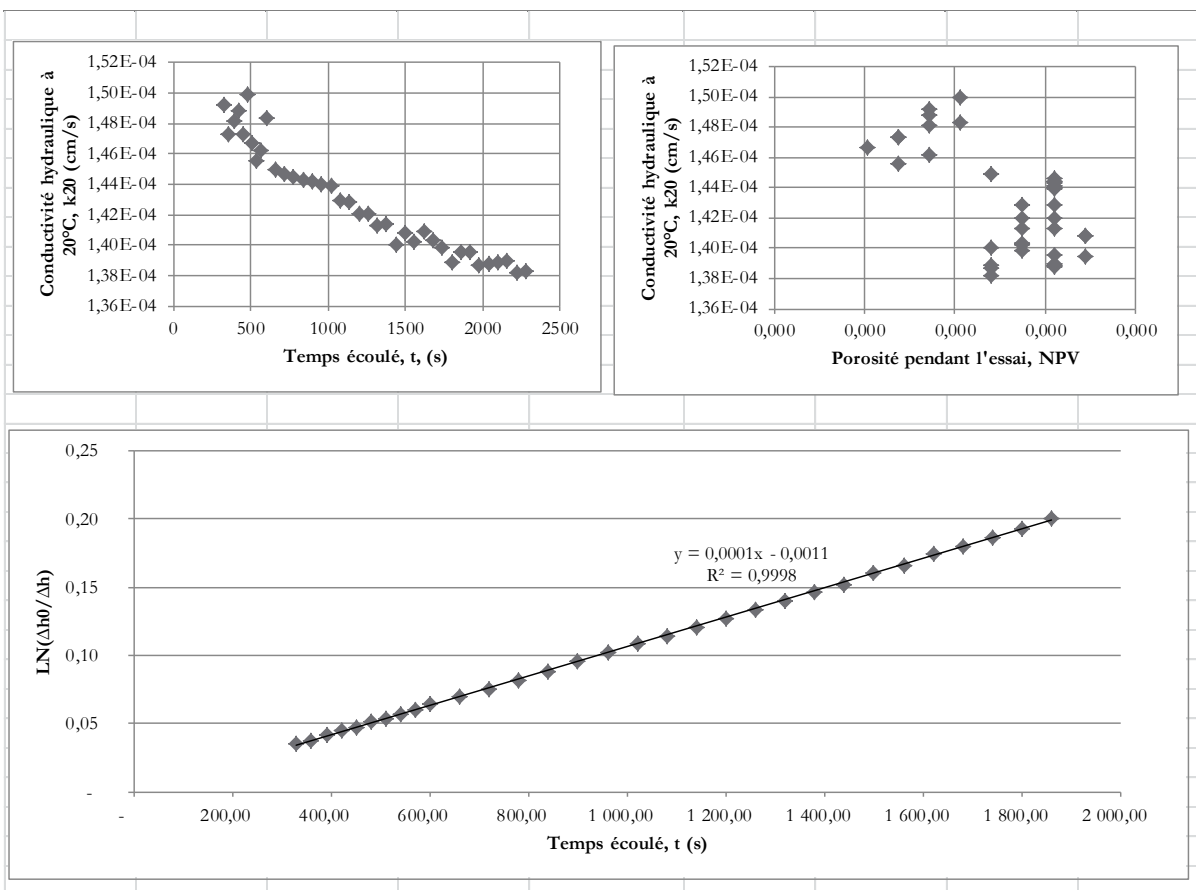


Figure B.4 : Graphique des résultats de l'essai de perméabilité #4 colonne 5-6

Tableau B.24 : Données de montage de l'essai de perméabilité #5 colonne 5-6

Conductivité hydraulique à charge constante des roches stériles									
Mine Tio - 0-10mm tamisé									
Échantillon reçu été 2013									
Information générale									
Testé par:		Isabelle Lévesque, Jérôme Goyer, Stéphanie Letourneur							
Laboratoire		IRME							
Date testé:		18-juil-14 Essai 5							
Projet:		Colonne 5-6 pour déterminer la courbe de rétention d'eau (CRE-A)							
Détails du test									
Diamètre max. particules				10 mm					
Diamètre du moule, D				14,4 cm					
Masse cellule vide et connections, M ₁				29 801,6 g					
Masse cellule eau désaéré et connections, M _e				49 699,6 g					
Masse cellule sol, air, connections, M ₂				74 801,6 g					
Masse cellule sol, eau, air, connections, M _{tot}				77 099,3 g					
Masse sol humide, M _{ms}				46 863,8 g					
Masse sèche du sol, M _s				41 896,0 g					
Masse eau, M _{win}				4 967,8 g					
Masse eau, M _{wf}				4 967,8 g					
Teneur en eau massique initiale, w _{in}				11,9 %					
Teneur en eau massique finale, w _f				11,9 %					
Densité relative du sol, G _s				2,745					
Indice des vides, e				0,426					
Porosité initial, n				0,299					
Volume des vides, V _v				4 212,6 cm ³					
Volume des pores, V _p				5 834,8 cm ³					
Volume eau, V _w				4 981,0 cm ³					
Niveau de saturation				118 %					
Aire de l'échantillon, A				161,96 cm ²					
Longueur de l'échantillon, L _f				120,50 cm					
Volume total, V _t				19 515,78 cm ³					
Aire du réservoir intrant, a _{in}				0,21 cm ²					
Aire du réservoir extrant, a _{out}				0,21 cm ²					
Température eau, T				23,8 °C					
Densité sèche initial, ρ _{di}				1,92 g/cm ³					
Densité sèche finale, ρ _{df}				1,92 g/cm ³					
Densité de l'eau, ρ _w				0,997 g/cm ³					
Facteur de correction, R _T à 20°C				0,899					
Précision de la balance utilisée:				200 g					
Méthode de préparation de l'échantillon:									
Moyenne k20		1,5E-04 cm/s							
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard									
Selon la procédure standard ASTM D5856-95(2002), le gradient hydraulique maximal recommandé est de 2 pour un sol don't la conductivité hydraulique prédite est à plus de 10 ⁻⁴ cm/s.									

Tableau B.25 : Mesures de l'essai de perméabilité #5 colonne 5-6

Mesures et calculs								
Test no.	Changement de charge (Δh)	Gradient hydraulique (i)	Volume (Q)	Temps (t)	Débit (q)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Porosité pendant l'essai N_{pv}
0	cm		cm ³	s	cm ³ /s	cm/s	cm/s	
1	151,2	1,25	-	-				
2	151,2	1,25	0,10	5,00	0,02	9,87E-05	1,89E-04	0,00
3	151,2	1,25	0,20	10,00	0,02	9,87E-05	1,89E-04	0,00
4	151,2	1,25	0,30	15,00	0,02	9,87E-05	1,89E-04	0,00
5	151,2	1,25	0,40	20,00	0,02	9,87E-05	1,89E-04	0,00
6	151,2	1,25	0,50	25,00	0,02	9,87E-05	1,89E-04	0,00
7	151,2	1,25	0,30	30,00	0,01	4,93E-05	9,47E-05	(0,00)
8	151,2	1,25	0,70	35,00	0,02	9,87E-05	1,89E-04	0,00
9	151,2	1,25	0,70	40,00	0,02	8,63E-05	1,66E-04	-
10	151,2	1,25	0,80	45,00	0,02	8,77E-05	1,68E-04	0,00
11	151,2	1,25	0,90	50,00	0,02	8,88E-05	1,70E-04	0,00
12	151,2	1,25	0,90	55,00	0,02	8,07E-05	1,55E-04	-
13	151,2	1,25	1,00	60,00	0,02	8,22E-05	1,58E-04	0,00
14	151,2	1,25	1,10	65,00	0,02	8,35E-05	1,60E-04	0,00
15	151,2	1,25	1,10	70,00	0,02	7,75E-05	1,49E-04	-
16	151,2	1,25	1,20	75,00	0,02	7,89E-05	1,52E-04	0,00
17	151,2	1,25	1,40	80,00	0,02	8,63E-05	1,66E-04	0,00
18	151,2	1,25	1,50	85,00	0,02	8,71E-05	1,67E-04	0,00
19	151,2	1,25	1,50	90,00	0,02	8,22E-05	1,58E-04	-
20	151,2	1,25	1,60	95,00	0,02	8,31E-05	1,59E-04	0,00
21	151,2	1,25	1,70	100,00	0,02	8,39E-05	1,61E-04	0,00
22	151,2	1,25	1,80	105,00	0,02	8,46E-05	1,62E-04	0,00
23	151,2	1,25	1,91	110,00	0,02	8,52E-05	1,64E-04	0,00
24	151,2	1,25	1,91	115,00	0,02	8,15E-05	1,56E-04	-
25	151,2	1,25	2,01	120,00	0,02	8,22E-05	1,58E-04	0,00
26	151,2	1,25	2,01	130,00	0,02	7,59E-05	1,46E-04	-
27	151,2	1,25	2,21	140,00	0,02	7,75E-05	1,49E-04	0,00
28	151,2	1,25	2,41	150,00	0,02	7,89E-05	1,52E-04	0,00
29	151,2	1,25	2,61	160,00	0,02	8,02E-05	1,54E-04	0,00
30	151,2	1,25	2,71	170,00	0,02	7,84E-05	1,50E-04	0,00
31	151,2	1,25	2,81	180,00	0,02	7,67E-05	1,47E-04	0,00
33	151,2	1,25	3,21	200,00	0,02	7,89E-05	1,52E-04	0,00
34	151,2	1,25	3,31	210,00	0,02	7,75E-05	1,49E-04	0,00
35	151,2	1,25	3,41	220,00	0,02	7,63E-05	1,46E-04	0,00
36	151,2	1,25	3,61	230,00	0,02	7,72E-05	1,48E-04	0,00
37	151,2	1,25	3,71	240,00	0,02	7,61E-05	1,46E-04	0,00
38	151,2	1,25	4,31	270,00	0,02	7,86E-05	1,51E-04	0,00
39	151,2	1,25	4,71	300,00	0,02	7,73E-05	1,48E-04	0,00
40	151,2	1,25	5,21	330,00	0,02	7,77E-05	1,49E-04	0,00
41	151,2	1,25	5,61	360,00	0,02	7,67E-05	1,47E-04	0,00
42	151,2	1,25	6,22	390,00	0,02	7,84E-05	1,51E-04	0,00
43	151,2	1,25	6,52	420,00	0,02	7,64E-05	1,47E-04	0,00
44	151,2	1,25	7,02	450,00	0,02	7,67E-05	1,47E-04	0,00
45	151,2	1,25	7,52	480,00	0,02	7,71E-05	1,48E-04	0,00
46	151,2	1,25	7,92	510,00	0,02	7,64E-05	1,47E-04	0,00
47	151,2	1,25	8,32	540,00	0,02	7,58E-05	1,46E-04	0,00
48	151,2	1,25	8,82	570,00	0,02	7,62E-05	1,46E-04	0,00
49	151,2	1,25	9,22	600,00	0,02	7,57E-05	1,45E-04	0,00

Tableau B.26 : Mesures de l'essai de perméabilité #5 colonne 5-6 (suite)

Mesures et calculs								
Test no.	Changement de charge (Δh)	Gradient hydraulique (i)	Volume (Q)	Temps (t)	Débit (q)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Porosité pendant l'essai N _{pv}
0	cm		cm ³	s	cm ³ /s	cm/s	cm/s	
49	151,2	1,25	9,22	600,00	0,02	7,57E-05	1,45E-04	0,00
50	151,2	1,25	9,83	630,00	0,02	7,67E-05	1,47E-04	0,00
51	151,2	1,25	10,23	660,00	0,02	7,63E-05	1,46E-04	0,00
52	151,2	1,25	11,03	720,00	0,02	7,54E-05	1,45E-04	0,00
53	151,2	1,25	11,93	780,00	0,02	7,53E-05	1,44E-04	0,00
54	151,2	1,25	12,93	840,00	0,02	7,58E-05	1,45E-04	0,00
55	151,2	1,25	13,74	900,00	0,02	7,51E-05	1,44E-04	0,00
56	151,2	1,25	14,64	960,00	0,02	7,50E-05	1,44E-04	0,00
57	151,2	1,25	15,64	1 020,00	0,02	7,55E-05	1,45E-04	0,00
58	151,2	1,25	16,34	1 080,00	0,02	7,45E-05	1,43E-04	0,00
59	151,2	1,25	17,35	1 140,00	0,02	7,49E-05	1,44E-04	0,00
60	151,2	1,25	18,15	1 200,00	0,02	7,44E-05	1,43E-04	0,00
61	151,2	1,25	19,15	1 260,00	0,02	7,48E-05	1,44E-04	0,00
62	151,2	1,25	20,05	1 320,00	0,02	7,48E-05	1,43E-04	0,00
63	151,2	1,25	20,96	1 380,00	0,02	7,47E-05	1,43E-04	0,00
64	151,2	1,25	21,86	1 440,00	0,02	7,47E-05	1,43E-04	0,00
65	151,2	1,25	22,66	1 500,00	0,02	7,43E-05	1,43E-04	0,00
66	151,2	1,25	23,66	1 560,00	0,02	7,46E-05	1,43E-04	0,00
67	151,2	1,25	24,46	1 620,00	0,02	7,43E-05	1,43E-04	0,00
68	151,2	1,25	25,37	1 680,00	0,02	7,43E-05	1,43E-04	0,00
69	151,2	1,25	26,17	1 740,00	0,02	7,40E-05	1,42E-04	0,00
70	151,2	1,25	26,97	1 800,00	0,01	7,37E-05	1,42E-04	0,00
71	151,2	1,25	27,87	1 860,00	0,01	7,37E-05	1,42E-04	0,00
72	151,2	1,25	28,78	1 920,00	0,01	7,38E-05	1,42E-04	0,00
73	151,2	1,25	29,68	1 980,00	0,01	7,38E-05	1,42E-04	0,00
74	151,2	1,25	30,58	2 040,00	0,01	7,38E-05	1,42E-04	0,00
75	151,2	1,25	31,48	2 100,00	0,01	7,38E-05	1,42E-04	0,00
76	151,2	1,25	32,39	2 160,00	0,01	7,38E-05	1,42E-04	0,00
77	151,2	1,25	33,29	2 220,00	0,01	7,38E-05	1,42E-04	0,00
78	151,2	1,25	33,99	2 280,00	0,01	7,34E-05	1,41E-04	0,00
79	151,2	1,25	34,89	2 340,00	0,01	7,34E-05	1,41E-04	0,00
80	151,2	1,25	35,79	2 400,00	0,01	7,34E-05	1,41E-04	0,00
81	151,2	1,25	36,60	2 460,00	0,01	7,32E-05	1,40E-04	0,00
82	151,2	1,25	37,40	2 520,00	0,01	7,30E-05	1,40E-04	0,00
83	151,2	1,25	38,40	2 580,00	0,01	7,32E-05	1,41E-04	0,00
84	151,2	1,25	39,20	2 640,00	0,01	7,31E-05	1,40E-04	0,00
85	151,2	1,25	40,11	2 700,00	0,01	7,31E-05	1,40E-04	0,00
86	151,2	1,25	40,91	2 760,00	0,01	7,29E-05	1,40E-04	0,00
87	151,2	1,25	41,71	2 820,00	0,01	7,28E-05	1,40E-04	0,00
88	151,2	1,25	42,51	2 880,00	0,01	7,26E-05	1,39E-04	0,00
89	151,2	1,25	43,41	2 940,00	0,01	7,27E-05	1,39E-04	0,00
90	151,2	1,25	44,32	3 000,00	0,01	7,27E-05	1,40E-04	0,00

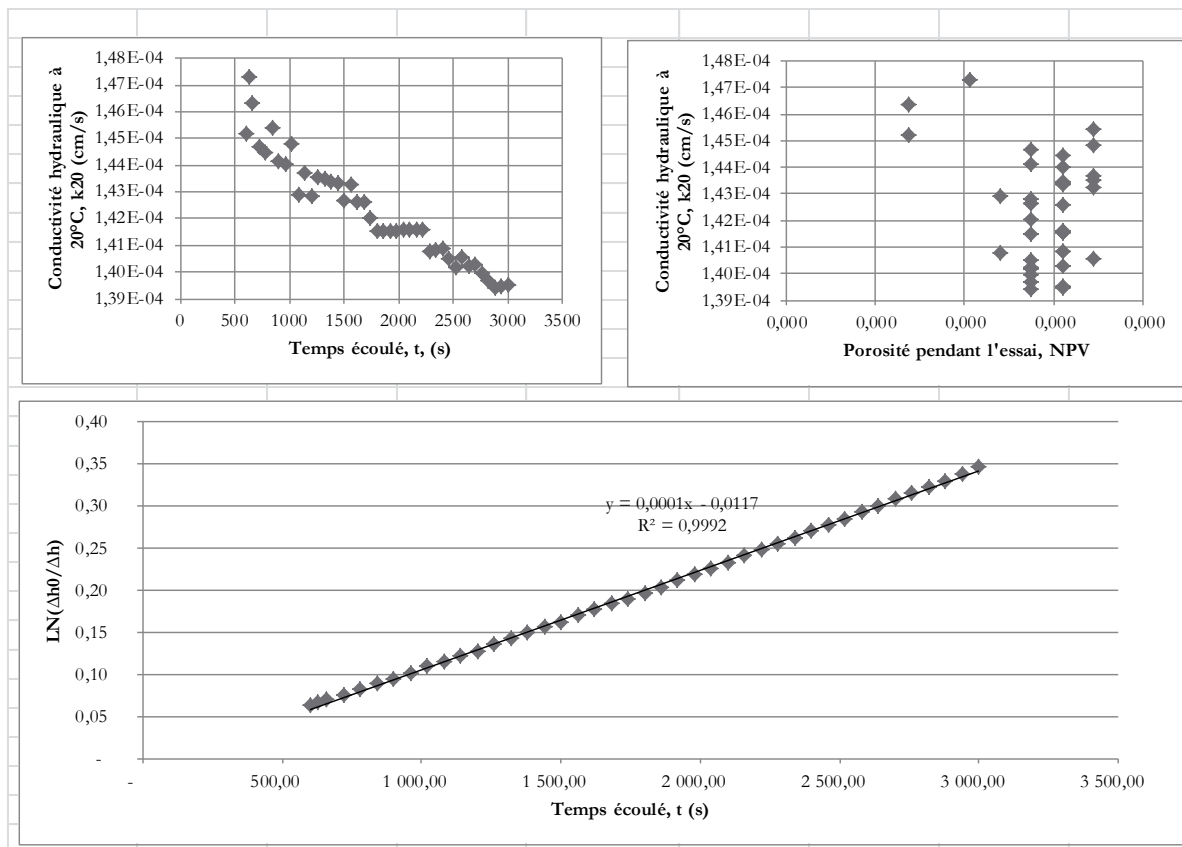


Figure B.5 : Graphiques des résultats de l'essai de perméabilité #5 colonne 5-6

Essais de drainage

Tableau B.27 : Données de montage pour l'essai de drainage CRE-A (colonne 5-6)

Test de courbe de rétention d'eau		
Mine Lac Tio Anorthosite tamisée à 0-10mm (échantillon été 2013)		
Colonnes #	CRE-A: 5-6 (#2)	
Test #	A	
Date:	28-juil-14	
Participants:	J. Goyer, S. Letourneur, I. Lévesque	
Détermination du poids unitaire (colonne):		
Diamètre, D	143,7 cm	
Aire, A	162,3 cm ²	
Longueur sol, L	119,5 cm	
Hauteur avant, H1	4,1 cm	
Hauteur après, H2	3,93 cm	
Hauteur nette, Hn	0,17 cm	
Poids avant, W1	76,334 kg	
Poids avant avec tensios, valves	78,652 kg	
Poids après, W2		kg
Poids net, Wn	-76,334 kg	
Suivi de la pression atmosphérique		
Sonde à l'air libre #		
Sonde baromètre #		
Hauteur sortie d'eau au bas de la colonne	3,1 cm	
Hauteur de la sortie d'eau (ligne de saturation)	21 cm	

Tableau B.28 : Données de montage pour l'essai de drainage CRE-A (colonne 5-6) (suite)

Suivi des données de base		
Poids éprouvette #1	49,2 g	
Poids éprouvette #2	61,2 g	
Poids éprouvette #3	49,8 g	
Poids éprouvette #4	60,7 g	
Poids éprouvette #11	89 g	
Poids éprouvette #12	90,7 g	
Poids éprouvette #13	241,2 g	
Poids éprouvette #14	364,5 g	
Poids entonnoir en acier	46,1 g	
Bécher 2000ml	1019,2 g	
Poids retenu de la colonne retenu par entonnoir su	44 g	
Heure et date début test (Téléphone cellulaire)	09:14	
Heure et date arrêt exfiltration		
Température eau ©	22	

Tableau B.29 : Mesures de l'essai de drainage CRE-A (colonne 5-6)

Échantillon		CRE-A: 5-6 (#2)						
Masse initiale de la colonne (kg)		78,652						
Masse finale de la colonne (kg)		76,542						
Longueur de la colonne (cm)		124,18						
Sommet du matériau p/r au planche		121,78						
Épaisseur de l'échantillon (cm)		119,50						
Aire de la section de la colonne (cm)		162,30						
Sortie d'eau p/r plancher (cm)		21,00						
Temps (s)		# éprouvette	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau
mesure	entre les mesures		éprouvette	éprouvette + eau	eau mesuré	mesuré	cumulé	(mL/s)
0		11	89	89	0	0,00	-	
5	5	11	89	91	2	2,01	2,01	0,402
10	5	11	89	93	4	4,02	4,02	0,402
15	5	11	89	95,1	6,1	6,13	6,13	0,408
20	5	11	89	95,5	6,5	6,53	6,53	0,326
25	5	11	89	98,3	9,3	9,34	9,34	0,374
30	5	11	89	99,8	10,8	10,85	10,85	0,362
35	5	11	89	101,3	12,3	12,35	12,35	0,353
40	5	11	89	102,3	13,3	13,36	13,36	0,334
45	5	11	89	103,8	14,8	14,87	14,87	0,330
50	5	11	89	105	16	16,07	16,07	0,321
55	5	11	89	106,4	17,4	17,48	17,48	0,318
60	5	11	89	107,3	18,3	18,38	18,38	0,306
65	5	11	89	108,4	19,4	19,49	19,49	0,300
70	5	11	89	109,5	20,5	20,59	20,59	0,294
75	5	11	89	110,2	21,2	21,29	21,29	0,284
80	5	11	89	111,3	22,3	22,40	22,40	0,280
85	5	11	89	112	23	23,10	23,10	0,272
90	5	11	89	113	24	24,11	24,11	0,268
95	5	11	89	113,9	24,9	25,01	25,01	0,263
100	5	11	89	114,7	25,7	25,81	25,81	0,258
105	5	11	89	115,4	26,4	26,52	26,52	0,253

Tableau B.30 : Mesures de l'essai de drainage CRE-A (colonne 5-6) (suite)

<i>suite</i>								
Temps (s)		# épreuves	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau (mL/s)
mesure	entre les		épreuve épreuve	épreuve tte +	eau mesuré	mesuré	cumulé	
110	5	11	89	116,2	27,2	27,32	27,32	0,248
115	5	11	89	117,3	28,3	28,43	28,43	0,247
120	5	11	89	117,9	28,9	29,03	29,03	0,242
130	10	11	89	119,2	30,2	30,33	30,33	0,233
140	10	11	89	120,5	31,5	31,64	31,64	0,226
150	10	11	89	122,2	33,2	33,35	33,35	0,222
160	10	11	89	123,2	34,2	34,35	34,35	0,215
170	10	11	89	124,3	35,3	35,46	35,46	0,209
180	10	11	89	125,5	36,5	36,66	36,66	0,204
190	10	11	89	126,8	37,8	37,97	37,97	0,200
200	10	11	89	127,8	38,8	38,97	38,97	0,195
210	10	11	89	129,1	40,1	40,28	40,28	0,192
220	10	11	89	130,1	41,1	41,28	41,28	0,188
230	10	11	89	131,2	42,2	42,39	42,39	0,184
240	10	11	89	132,3	43,3	43,49	43,49	0,181
270	30	11	89	135,1	46,1	46,31	46,31	0,172
300	30	11+12	179,7	228,9	49,2	49,42	49,42	0,165
330	30	11+12	179,7	231,7	52	52,23	52,23	0,158
360	30	11+12	179,7	234,5	54,8	55,04	55,04	0,153
390	30	11+12	179,7	237,4	57,7	57,96	57,96	0,149
420	30	11+12	179,7	240,1	60,4	60,67	60,67	0,144
450	30	11+12	179,7	242,9	63,2	63,48	63,48	0,141
480	30	11+12	179,7	245,7	66	66,29	66,29	0,138
510	30	11+12	179,7	248,4	68,7	69,01	69,01	0,135
540	30	11+12	179,7	251,1	71,4	71,72	71,72	0,133
570	30	11+12	179,7	253,8	74,1	74,43	74,43	0,131
600	30	11+12	179,7	256,6	76,9	77,24	77,24	0,129
660	60	11+12	179,7	261,9	82,2	82,57	82,57	0,125
720	60	11+12	179,7	267,3	87,6	87,99	87,99	0,122
780	60	11+12	179,7	272,8	93,1	93,52	93,52	0,120
840	60	11+12	179,7	278,1	98,4	98,84	98,84	0,118
900	60	11+12	179,7	283,3	103,6	104,06	104,06	0,116
960	60	11+12 +4	240,4	349,8	109,4	109,89	109,89	0,114

Tableau B.31 : Mesures de l'essai de drainage CRE-A (colonne 5-6) (suite)

<i>suite</i>								
Temps (s)		# épreuve	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau (mL/s)
mesure	entre les		épreuve épreuve	tte +	eau mesuré	mesuré	cumulé	
1020	60	11+12 +4	240,4	356,9	116,5	117,02	117,02	0,115
1080	60	11+12 +4	240,4	362,8	122,4	122,95	122,95	0,114
1140	60	11+12 +4	240,4	368,2	127,8	128,37	128,37	0,113
1140	0	4	60,7	82,4	21,7	21,80	150,17	0,132
1200	60	4	60,7	84,8	24,1	24,21	152,58	0,127
1260	60	4	60,7	91,9	31,2	31,34	159,71	0,127
1320	60	4+12	151,4	186,2	34,8	34,96	163,33	0,124
1380	60	12	90,7	101,9	11,2	11,25	174,58	0,127
1440	60	12	90,7	107	16,3	16,37	179,70	0,125
1500	60	12	90,7	112,2	21,5	21,60	184,92	0,123
1560	60	12	90,7	117,5	26,8	26,92	190,25	0,122
1620	60	12	90,7	122,8	32,1	32,24	195,57	0,121
1680	60	12	90,7	128,2	37,5	37,67	200,99	0,120
1740	60	12	90,7	133,3	42,6	42,79	206,12	0,118
1800	60	12	90,7	138,5	47,8	48,01	211,34	0,117
1860	60	11	89	94	5	5,02	216,36	0,116
1920	60	11	89	99,3	10,3	10,35	221,69	0,115
1980	60	11	89	104,5	15,5	15,57	226,91	0,115
2040	60	11	89	109,8	20,8	20,89	232,23	0,114
2100	60	11	89	115	26	26,12	237,46	0,113
2160	60	11	89	120,2	31,2	31,34	242,68	0,112
2220	60	11	89	125,5	36,5	36,66	248,00	0,112
2280	60	11	89	130,5	41,5	41,69	253,03	0,111
2340	60	11	89	135,6	46,6	46,81	258,15	0,110
2400	60	12	90,7	95,2	4,5	4,52	262,67	0,109
2460	60	12	90,7	100,5	9,8	9,84	267,99	0,109
2520	60	12	90,7	105,6	14,9	14,97	273,11	0,108
2580	60	12	90,7	110,7	20	20,09	278,24	0,108
2640	60	12	90,7	115,9	25,2	25,31	283,46	0,107
2700	60	12	90,7	121,3	30,6	30,74	288,88	0,107
2760	60	12	90,7	126,2	35,5	35,66	293,81	0,106
2820	60	12	90,7	131,4	40,7	40,88	299,03	0,106

Tableau B.32 : Mesures de l'essai de drainage CRE-A (colonne 5-6) (suite)

<i>suite</i>								
Temps (s)		# épreuve	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau (mL/s)
mesure	entre les		épreuve	épreuve tte +	eau mesuré	mesuré	cumulé	
2880	60	12	90,7	136,5	45,8	46,00	304,15	0,106
2940	60	11	89	93,3	4,3	4,32	308,47	0,105
3000	60	11	89	98,4	9,4	9,44	313,59	0,105
3060	60	11	89	103,4	14,4	14,46	318,62	0,104
3120	60	11	89	108,7	19,7	19,79	323,94	0,104
3180	60	11	89	113,8	24,8	24,91	329,06	0,103
3240	60	11	89	119,1	30,1	30,23	334,39	0,103
3300	60	11	89	124	35	35,16	339,31	0,103
3360	60	11	89	129,2	40,2	40,38	344,53	0,103
3420	60	11	89	134,2	45,2	45,40	349,55	0,102
3480	60	12	90,7	95,5	4,8	4,82	354,38	0,102
3540	60	12	90,7	100,7	10	10,04	359,60	0,102
3600	60	12	90,7	105,8	15,1	15,17	364,72	0,101
3900	300	12	90,7	131,2	40,5	40,68	390,24	0,100
4200	300	11	89	113,7	24,7	24,81	415,05	0,099
4500	300	11	89	138,9	49,9	50,12	399,68	0,089
4800	300	12	90,7	115,3	24,6	24,71	424,39	0,088
5100	300	12	90,7	140,3	49,6	49,82	449,50	0,088
5400	300	13	241,2	263,7	22,5	22,60	472,10	0,087
5700	300	13	241,2	288,7	47,5	47,71	497,21	0,087
6000	300	13	241,2	313,5	72,3	72,62	522,12	0,087
6300	300	13	241,2	337,9	96,7	97,13	546,63	0,087
6600	300	13	241,2	361,4	120,2	120,74	570,24	0,086
6900	300	13	241,2	383,2	142	142,63	592,13	0,086
7200	300	13	241,2	402,1	160,9	161,62	611,12	0,085
7500	300	13	241,2	420	178,8	179,60	629,10	0,084
7800	300	13	241,2	438	196,8	197,68	647,18	0,083
8400	600	13	241,2	471,3	230,1	231,13	680,63	0,081
9000	600	11	89	118,8	29,8	29,93	710,56	0,079
9600	600	11	89	150,3	61,3	61,57	742,20	0,077
10200	600	13	241,2	274,8	33,6	33,75	775,95	0,076
11100	900	13	241,2	310,5	69,3	69,61	811,81	0,073
11400	300	13	241,2	320,6	79,4	79,75	821,96	0,072
12000	600	13	241,2	345,4	104,2	104,67	846,87	0,071
12600	600	13	241,2	352,9	111,7	112,20	854,40	0,068

Tableau B.33 : Mesures de l'essai de drainage CRE-A (colonne 5-6) (suite)

<i>suite</i>								
Temps (s)		# épreuve	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau (mL/s)
mesure	entre les		épreuve	épreuve tte +	eau mesuré	mesuré	cumulé	
13200	600	13	241,2	362,1	120,9	121,44	863,64	0,065
13800	600	13	241,2	380,3	139,1	139,72	881,92	0,064
14400	600	13	241,2	392,9	151,7	152,38	894,58	0,062
16200	1800	13	241,2	422,4	181,2	182,01	924,21	0,057
18000	1800	13	241,2	499,6	258,4	259,55	1 001,76	0,056
18300	300	13	241,2	505,6	264,4	265,58	1 007,78	0,055
18600	300	13	241,2	509,8	268,6	269,80	1 012,00	0,054
19800	1200	13	241,2	525,6	284,4	285,67	1 027,87	0,052
21600	1800	13	241,2	311,6	70,4	70,71	1 098,59	0,051
23400	1800	13	241,2	331,5	90,3	90,70	1 118,58	0,048
25200	1800	13	241,2	348,6	107,4	107,88	1 135,75	0,045
28800	3600	13	241,2	378,4	137,2	137,81	1 165,68	0,040
30300	1500	13	241,2	389,1	147,9	148,56	1 176,43	0,039
30600	300	13	241,2	391,1	149,9	150,57	1 178,44	0,039
30900	300	13	241,2	393,1	151,9	152,58	1 180,45	0,038
31200	300	13	241,2	397,5	156,3	157,00	1 184,87	0,038
31500	300	13+ bécher	1260,4	1422	161,6	162,32	1 347,19	0,043
32400	900	13+ bécher	1260,4	1422,7	162,3	163,03	1 347,90	0,042
36000	3600	13+ bécher	1260,4	1439,5	179,1	179,90	1 364,77	0,038
39600	3600	13+ bécher	1260,4	1459,7	199,3	200,19	1 385,06	0,035
43200	3600	13+ bécher	1260,4	1477,6	217,2	218,17	1 403,04	0,032
46800	3600	13+ bécher	1260,4	1490,8	230,4	231,43	1 416,30	0,030
50400	3600	13+ bécher	1260,4	1504,2	243,8	244,89	1 429,76	0,028
54000	3600	13+ bécher	1260,4	1515,8	255,4	256,54	1 441,41	0,027
57600	3600	13+ bécher	1260,4	1527,4	267	268,19	1 453,06	0,025

Tableau B.34 : Mesures de l'essai de drainage CRE-A (colonne 5-6) (suite)

<i>suite</i>								
Temps (s)		#	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau
mesure	entre les	épreuve	épreuve	épreuve	eau	mesuré	cumulé	(mL/s)
		tte	épreuve	tte +	mesuré			
61200	3600	13+ bécher	1260,4	1539,6	279,2	280,45	1 465,32	0,024
64800	3600	13+ bécher	1260,4	1552,6	292,2	293,51	1 478,38	0,023
68400	3600	13+ bécher	1260,4	1564	303,6	304,96	1 489,83	0,022
72000	3600	13+ bécher	1260,4	1573,7	313,3	314,70	1 499,57	0,021
75600	3600	13+ bécher	1260,4	1582	321,6	323,04	1 507,91	0,020
79200	3600	13+ bécher	1260,4	1590,4	330	331,47	1 516,34	0,019
82800	3600	13+ bécher	1260,4	1600,9	340,5	342,02	1 526,89	0,018
86400	3600	13+ bécher	1260,4	1611,5	351,1	352,67	1 537,54	0,018
90000	3600	13+ bécher	1260,4	1617,1	356,7	358,29	1 543,16	0,017
93600	3600	13+ bécher + entonnoir	1260,4	1530,1	269,7	270,90	1 814,07	0,019
97200	3600	13+ entonno	287,3	471,1	183,8	184,62	1 998,69	0,021
97961	761	13+ entonno	287,3	472	184,7	185,53	1 999,59	0,020
98010	49	13+ entonno	287,3	291,1	3,8	3,82	2 003,41	0,020
100800	2790	13+ entonno	287,3	293,5	6,2	6,23	2 005,82	0,020
104400	3600	13+ entonno	287,3	297,6	10,3	10,35	2 009,94	0,019
108000	3600	13+ entonno	287,3	301,6	14,3	14,36	2 013,96	0,019
111600	3600	13+ entonno	287,3	305,3	18	18,08	2 017,67	0,018

Tableau B.35 : Mesures de l'essai de drainage CRE-A (colonne 5-6) (suite)

<i>suite</i>								
Temps (s)		#	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau
mesure	entre les	épreuve	épreuve	épreuve	eau	mesuré	cumulé	(mL/s)
		tte	épreuve	tte +	mesuré			
115200	3600	13+ entonno	287,3	308,9	21,6	21,70	2 021,29	0,018
118800	3600	13+ entonno	287,3	312,4	25,1	25,21	2 024,81	0,017
122400	3600	13+ entonno	287,3	315,7	28,4	28,53	2 028,12	0,017
126000	3600	13+ entonno	287,3	318,7	31,4	31,54	2 031,13	0,016
129600	3600	13+ entonno	287,3	321,7	34,4	34,55	2 034,15	0,016
133200	3600	13+ entonno	287,3	324,6	37,3	37,47	2 037,06	0,015
136800	3600	13+ entonno	287,3	327,5	40,2	40,38	2 039,97	0,015
140400	3600	13+ entonno	287,3	330,2	42,9	43,09	2 042,69	0,015
144000	3600	13+ entonno	287,3	332,8	45,5	45,70	2 045,30	0,014
147600	3600	13+ entonno	287,3	335,1	47,8	48,01	2 047,61	0,014
151200	3600	13+ entonno	287,3	337,6	50,3	50,52	2 050,12	0,014
171300	20100	13+ entonno	287,3	348,6	61,3	61,57	2 061,17	0,012

Tableau B.36 : Mesures de l'essai de drainage CRE-A (colonne 5-6) (suite)

<i>suite</i>								
Temps (s)		#	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau
mesure	entre les	épreuve tte	épreuve	épreuve tte +	eau mesuré	mesuré	cumulé	(mL/s)
172200	900	13+ entonno	287,3	349	61,7	61,98	2 061,57	0,012
172980	780	13+ entonno	287,3	349,3	62	62,28	2 061,87	0,012
223200	50220	11	89	106,1	17,1	17,18	2 079,05	0,009
262800	39600	11	89	116,9	27,9	28,02	2 089,90	0,008
273600	10800	11	89	119,3	30,3	30,44	2 092,31	0,008
282600	9000	11	89	119,9	30,9	31,04	2 092,91	0,007
288000	5400	11	89	120,1	31,1	31,24	2 093,11	0,007
347400	59400	11	89	124,2	35,2	35,36	2 097,23	0,006
348120	720	11	89	124,3	35,3	35,46	2 097,33	0,006
466740	118620	11	89	102,1	13,1	13,16	2 110,49	0,005
553320	86580	11	89	104,8	15,8	15,87	2 113,20	0,004
572880	19560	11	89	105,2	16,2	16,27	2 113,60	0,004
718080	145200	11	89	111,1	22,1	22,20	2 119,53	0,003

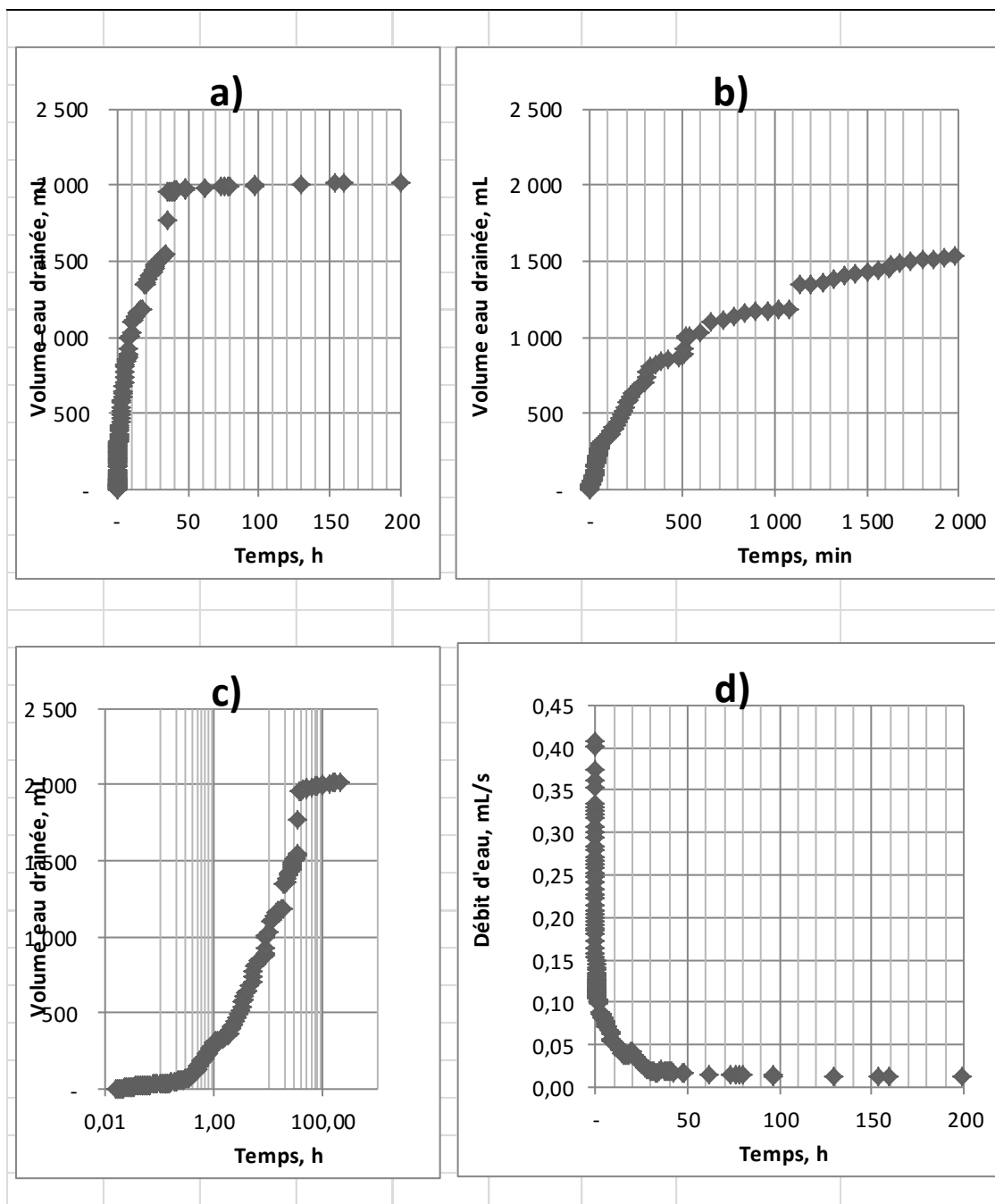


Figure B.6 : Graphiques des résultats de l'essai de drainage CRE-A (colonne 5-6)

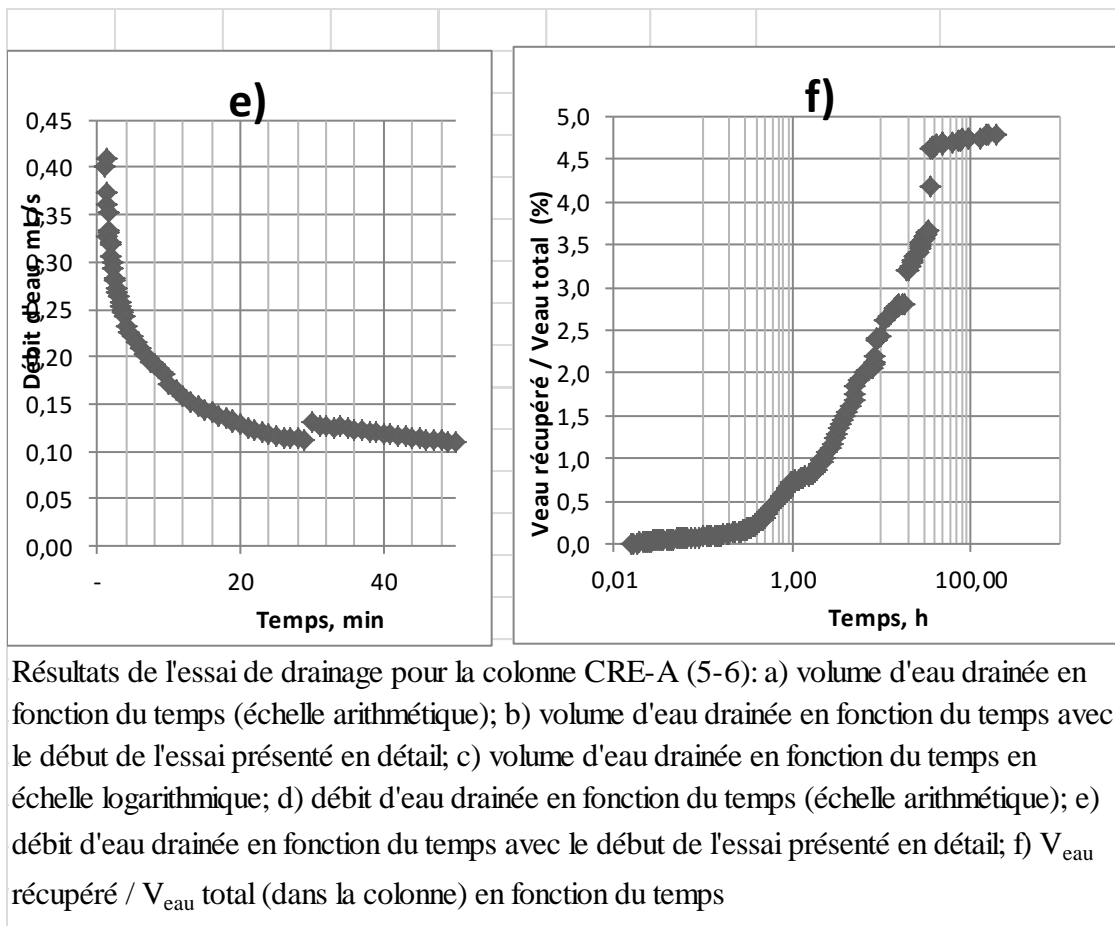


Figure B.7 : Graphiques des résultats de l'essai de drainage CRE-A (colonne 5-6) (suite)

Tableau B.37 : Données de montage pour l'essai de drainage de la colonne CRE-B (colonne 9-11)

Test de courbe de rétention d'eau		
Mine Lac Tio Anorthosite tamisée à 0-10mm (échantillon été 2013)		
Colonnes #	CRE-B: 9-11 (#1)	
Test #	B	
Date:	30-juil-14	
Participants:	J. Goyer, S. Letourneur, I. Lévesque	
Détermination du poids unitaire (colonne):		
Diamètre, D	143,7	cm
Aire, A	162,3	cm ²
Longueur sol, L	120,215	cm
Hauteur avant, H1	120,2	cm
Hauteur après, H2	120,23	cm
Hauteur nette, Hn	-0,03	cm
Poids avant, W1	76,858	kg
Poids avant avec tensios, valves	79,426	kg
Poids après, W2	75,214	kg
Poids net, Wn	-1,644	kg
Suivi de la pression atmosphérique		
Sonde à l'air libre #		
Sonde baromètre #	C0713	
Hauteur sortie d'eau au bas de la colonne	3	cm
Hauteur de la sortie d'eau (ligne de saturation)	25,5	cm

Tableau B.38 : Données de montage pour l'essai de drainage de la colonne CRE-B (colonne 9-11) (suite)

Suivi des données de base		
Poids éprouvette #1	49,2 g	
Poids éprouvette #2	61,5 g	
Poids éprouvette #3	49,8 g	
Poids éprouvette #4	60,8 g	
Poids éprouvette #11		g
Poids éprouvette #12	90,7 g	
Poids éprouvette #13	241,9 g	
Poids éprouvette #14	364,2 g	
Poids entonnoir en acier		g
Bécher 2000ml	1019,5 g	
Cylindre noir	74,3 g	
Heure et date début test (Téléphone cellulaire)	09:50	
Heure et date arrêt exfiltration		
Température eau ©	22	

Tableau B.39 : Mesures pour l'essai de drainage de la colonne CRE-B (colonne 9-11)

Échantillon			CRE-B: 9-11 (#1)					
Masse initiale de la colonne (kg)			76,858					
Masse finale de la colonne (kg)			75,214					
Longueur de la colonne (cm)			126,20					
Sommet du matériau p/r au plancher (cm)			123,21					
Épaisseur de l'échantillon (cm)			120,22					
Aire de la section de la colonne (cm²)			162,30					
Sortie d'eau p/r plancher (cm)			28,50					
Temps (s)		# éprouvette	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau (mL/s)
mesure	entre les mesures		éprouvette	épreuve tte + eau	eau mesuré	mesuré	cumulé	
0		Bécher	1093,8	1094	0,2	0,20	0,20	
5	5	Bécher	1093,8	1095,5	1,7	1,71	1,71	0,342
10	5	Bécher	1093,8	1096,9	3,1	3,11	3,11	0,311
15	5	Bécher	1093,8	1098,3	4,5	4,52	4,52	0,301
20	5	Bécher	1093,8	1099,8	6	6,03	6,03	0,301
25	5	Bécher	1093,8	1101	7,2	7,23	7,23	0,289
30	5	Bécher	1093,8	1102,3	8,5	8,54	8,54	0,285
35	5	Bécher	1093,8	1103,6	9,8	9,84	9,84	0,281
40	5	Bécher	1093,8	1104,8	11	11,05	11,05	0,276
45	5	Bécher	1093,8	1106	12,2	12,25	12,25	0,272
50	5	Bécher	1093,8	1107,1	13,3	13,36	13,36	0,267
55	5	Bécher	1093,8	1108,4	14,6	14,67	14,67	0,267
60	5	Bécher	1093,8	1109,5	15,7	15,77	15,77	0,263
65	5	Bécher	1093,8	1110,7	16,9	16,98	16,98	0,261
71	6	Bécher	1093,8	1111,8	18	18,08	18,08	0,255
76	5	Bécher	1093,8	1113	19,2	19,29	19,29	0,254
81	5	Bécher	1093,8	1114,1	20,3	20,39	20,39	0,252
86	5	Bécher	1093,8	1115	21,2	21,29	21,29	0,248
91	5	Bécher	1093,8	1116,3	22,5	22,60	22,60	0,248
96	5	Bécher	1093,8	1117,3	23,5	23,60	23,60	0,246
101	5	Bécher	1093,8	1118,4	24,6	24,71	24,71	0,245
106	5	Bécher	1093,8	1119,4	25,6	25,71	25,71	0,243
111	5	Bécher	1093,8	1120,7	26,9	27,02	27,02	0,243
116	5	Bécher	1093,8	1121,7	27,9	28,02	28,02	0,242
121	5	Bécher	1093,8	1122,7	28,9	29,03	29,03	0,240
126	5	Bécher	1093,8	1123,9	30,1	30,23	30,23	0,240
131	5	Bécher	1093,8	1125	31,2	31,34	31,34	0,239
136	5	Bécher	1093,8	1125,9	32,1	32,24	32,24	0,237
142	6	Bécher	1093,8	1127,1	33,3	33,45	33,45	0,236

Tableau B.40 : Mesures pour l'essai de drainage de la colonne CRE-B (colonne 9-11) (suite)

suite								
Temps (s)		# éprouvette	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau (mL/s)
mesure	entre les mesures		éprouvette	éprouvette + eau	eau mesuré	mesuré	cumulé	
147	5	Bécher	1093,8	1128,2	34,4	34,55	34,55	0,235
152	5	Bécher	1093,8	1129,3	35,5	35,66	35,66	0,235
157	5	Bécher	1093,8	1130,4	36,6	36,76	36,76	0,234
162	5	Bécher	1093,8	1131,3	37,5	37,67	37,67	0,233
167	5	Bécher	1093,8	1132,4	38,6	38,77	38,77	0,232
172	5	Bécher	1093,8	1133,5	39,7	39,88	39,88	0,232
177	5	Bécher	1093,8	1134,6	40,8	40,98	40,98	0,232
182	5	Bécher	1093,8	1135,6	41,8	41,99	41,99	0,231
187	5	Bécher	1093,8	1136,7	42,9	43,09	43,09	0,230
192	5	Bécher	1093,8	1137,8	44	44,20	44,20	0,230
197	5	Bécher	1093,8	1138,9	45,1	45,30	45,30	0,230
202	5	Bécher	1093,8	1139,9	46,1	46,31	46,31	0,229
207	5	Bécher	1093,8	1141,1	47,3	47,51	47,51	0,230
213	6	Bécher	1093,8	1142,1	48,3	48,52	48,52	0,228
218	5	Bécher	1093,8	1143,2	49,4	49,62	49,62	0,228
223	5	Bécher	1093,8	1144,3	50,5	50,73	50,73	0,227
228	5	Bécher	1093,8	1145,4	51,6	51,83	51,83	0,227
233	5	Bécher	1093,8	1146,4	52,6	52,83	52,83	0,227
238	5	Bécher	1093,8	1147,5	53,7	53,94	53,94	0,227
243	5	Bécher	1093,8	1148,4	54,6	54,84	54,84	0,226
248	5	Bécher	1093,8	1149,6	55,8	56,05	56,05	0,226
253	5	Bécher	1093,8	1150,6	56,8	57,05	57,05	0,226
258	5	Bécher	1093,8	1151,7	57,9	58,16	58,16	0,225
263	5	Bécher	1093,8	1152,7	58,9	59,16	59,16	0,225
268	5	Bécher	1093,8	1153,8	60	60,27	60,27	0,225
273	5	Bécher	1093,8	1154,9	61,1	61,37	61,37	0,225
278	5	Bécher	1093,8	1156	62,2	62,48	62,48	0,225
284	6	Bécher	1093,8	1157,1	63,3	63,58	63,58	0,224
289	5	Bécher	1093,8	1158,1	64,3	64,59	64,59	0,223
294	5	Bécher	1093,8	1159,2	65,4	65,69	65,69	0,223
299	5	Bécher	1093,8	1160,4	66,6	66,90	66,90	0,224
304	5	Bécher	1093,8	1161,3	67,5	67,80	67,80	0,223
309	5	Bécher	1093,8	1162,5	68,7	69,01	69,01	0,223
314	5	Bécher	1093,8	1163,5	69,7	70,01	70,01	0,223
319	5	Bécher	1093,8	1164,6	70,8	71,12	71,12	0,223
324	5	Bécher	1093,8	1165,6	71,8	72,12	72,12	0,223
329	5	Bécher	1093,8	1166,7	72,9	73,23	73,23	0,223
334	5	Bécher	1093,8	1167,8	74	74,33	74,33	0,223
339	5	Bécher	1093,8	1168,9	75,1	75,44	75,44	0,223
344	5	Bécher	1093,8	1169,9	76,1	76,44	76,44	0,222
350	6	Bécher	1093,8	1171,1	77,3	77,65	77,65	0,222
355	5	Bécher	1093,8	1172,1	78,3	78,65	78,65	0,222
360	5	Bécher	1093,8	1173,2	79,4	79,75	79,75	0,222
365	5	Bécher	1093,8	1174,2	80,4	80,76	80,76	0,221
370	5	Bécher	1093,8	1175,2	81,4	81,76	81,76	0,221
375	5	Bécher	1093,8	1176,4	82,6	82,97	82,97	0,221
380	5	Bécher	1093,8	1177,5	83,7	84,07	84,07	0,221
385	5	Bécher	1093,8	1178,6	84,8	85,18	85,18	0,221
390	5	Bécher	1093,8	1179,7	85,9	86,28	86,28	0,221
395	5	Bécher	1093,8	1180,7	86,9	87,29	87,29	0,221

Tableau B.41 : Mesures pour l'essai de drainage de la colonne CRE-B (colonne 9-11) (suite)

suite								
Temps (s)		# éprouvette	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau (mL/s)
mesure	entre les mesures		éprouvette	éprouvette + eau	eau mesuré	mesuré	cumulé	
1922	5	Bécher	1093,8	1507,7	413,9	415,75	415,75	0,216
1927	5	Bécher	1093,8	1508,8	415	416,85	416,85	0,216
1932	5	Bécher	1093,8	1509,8	416	417,86	417,86	0,216
1937	5	Bécher	1093,8	1511	417,2	419,06	419,06	0,216
1942	5	Bécher	1093,8	1512	418,2	420,07	420,07	0,216
1947	5	Bécher	1093,8	1513,1	419,3	421,17	421,17	0,216
1952	5	Bécher	1093,8	1514,1	420,3	422,18	422,18	0,216
1957	5	Bécher	1093,8	1515,2	421,4	423,28	423,28	0,216
1962	5	Bécher	1093,8	1516,3	422,5	424,39	424,39	0,216
1967	5	Bécher	1093,8	1517,3	423,5	425,39	425,39	0,216
1972	5	Bécher	1093,8	1518,4	424,6	426,50	426,50	0,216
1977	5	Bécher	1093,8	1519,5	425,7	427,60	427,60	0,216
1983	6	Bécher	1093,8	1520,6	426,8	428,71	428,71	0,216
1988	5	Bécher	1093,8	1521,6	427,8	429,71	429,71	0,216
1993	5	Bécher	1093,8	1522,6	428,8	430,72	430,72	0,216
1998	5	Bécher	1093,8	1523,8	430	431,92	431,92	0,216
2003	5	Bécher	1093,8	1524,8	431	432,93	432,93	0,216
2008	5	Bécher	1093,8	1525,9	432,1	434,03	434,03	0,216
2013	5	Bécher	1093,8	1527	433,2	435,14	435,14	0,216
2018	5	Bécher	1093,8	1528,1	434,3	436,24	436,24	0,216
2023	5	Bécher	1093,8	1529,1	435,3	437,24	437,24	0,216
2028	5	Bécher	1093,8	1530,2	436,4	438,35	438,35	0,216
2033	5	Bécher	1093,8	1531,3	437,5	439,45	439,45	0,216
2038	5	Bécher	1093,8	1532,3	438,5	440,46	440,46	0,216
2043	5	Bécher	1093,8	1533,4	439,6	441,56	441,56	0,216
2048	5	Bécher	1093,8	1534,4	440,6	442,57	442,57	0,216
2053	5	Bécher	1093,8	1535,5	441,7	443,67	443,67	0,216
2059	6	Bécher	1093,8	1536,6	442,8	444,78	444,78	0,216
2064	5	Bécher	1093,8	1537,6	443,8	445,78	445,78	0,216
2069	5	Bécher	1093,8	1538,7	444,9	446,89	446,89	0,216
2074	5	Bécher	1093,8	1539,7	445,9	447,89	447,89	0,216
2079	5	Bécher	1093,8	1540,8	447	449,00	449,00	0,216
2084	5	Bécher	1093,8	1541,7	447,9	449,90	449,90	0,216
2089	5	Bécher	1093,8	1542,8	449	451,01	451,01	0,216
2094	5	Bécher	1093,8	1543,8	450	452,01	452,01	0,216
2099	5	Bécher	1093,8	1544,9	451,1	453,12	453,12	0,216
2104	5	Bécher	1093,8	1545,8	452	454,02	454,02	0,216
2109	5	Bécher	1093,8	1546,8	453	455,02	455,02	0,216
2114	5	Bécher	1093,8	1547,9	454,1	456,13	456,13	0,216
2119	5	Bécher	1093,8	1548,8	455	457,03	457,03	0,216
2124	5	Bécher	1093,8	1549,9	456,1	458,14	458,14	0,216
2130	6	Bécher	1093,8	1550,8	457	459,04	459,04	0,216
2135	5	Bécher	1093,8	1551,9	458,1	460,15	460,15	0,216
2140	5	Bécher	1093,8	1552,7	458,9	460,95	460,95	0,215
2145	5	Bécher	1093,8	1553,7	459,9	461,95	461,95	0,215
2150	5	Bécher	1093,8	1554,7	460,9	462,96	462,96	0,215

Tableau B.42 : Mesures pour l'essai de drainage de la colonne CRE-B (colonne 9-11) (suite)

suite								
Temps (s)		# éprouvette	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau (mL/s)
mesure	entre les mesures		éprouvette	éprouvette + eau	eau mesuré	mesuré	cumulé	
4543	5	Bécher	1093,8	1861,7	767,9	771,33	771,33	0,170
4549	6	Bécher	1093,8	1862,2	768,4	771,83	771,83	0,170
4554	5	Bécher	1093,8	1862,6	768,8	772,23	772,23	0,170
4559	5	Bécher	1093,8	1863,1	769,3	772,74	772,74	0,169
4564	5	Bécher	1093,8	1863,5	769,7	773,14	773,14	0,169
4569	5	Bécher	1093,8	1864,1	770,3	773,74	773,74	0,169
4574	5	Bécher	1093,8	1864,6	770,8	774,24	774,24	0,169
4579	5	Bécher	1093,8	1865	771,2	774,65	774,65	0,169
4584	5	Bécher	1093,8	1865,5	771,7	775,15	775,15	0,169
4589	5	Bécher	1093,8	1865,9	772,1	775,55	775,55	0,169
4594	5	Bécher	1093,8	1866,5	772,7	776,15	776,15	0,169
4599	5	Bécher	1093,8	1866,9	773,1	776,55	776,55	0,169
4604	5	Bécher	1093,8	1867,4	773,6	777,06	777,06	0,169
4609	5	Bécher	1093,8	1867,9	774,1	777,56	777,56	0,169
4614	5	Bécher	1093,8	1868,4	774,6	778,06	778,06	0,169
4620	6	Bécher	1093,8	1868,9	775,1	778,56	778,56	0,169
4625	5	Bécher	1093,8	1869,2	775,4	778,86	778,86	0,168
4630	5	Bécher	1093,8	1869,8	776	779,47	779,47	0,168
4635	5	Bécher	1093,8	1870,2	776,4	779,87	779,87	0,168
4640	5	Bécher	1093,8	1870,7	776,9	780,37	780,37	0,168
4645	5	Bécher	1093,8	1871,3	777,5	780,97	780,97	0,168
4650	5	Bécher	1093,8	1871,6	777,8	781,27	781,27	0,168
4655	5	Bécher	1093,8	1872,1	778,3	781,78	781,78	0,168
4660	5	Bécher	1093,8	1872,6	778,8	782,28	782,28	0,168
4665	5	Bécher	1093,8	1873,1	779,3	782,78	782,78	0,168
4670	5	Bécher	1093,8	1873,5	779,7	783,18	783,18	0,168
4675	5	Bécher	1093,8	1874	780,2	783,69	783,69	0,168
4680	5	Bécher	1093,8	1874,5	780,7	784,19	784,19	0,168
4685	5	Bécher	1093,8	1875	781,2	784,69	784,69	0,167
4691	6	Bécher	1093,8	1875,3	781,5	784,99	784,99	0,167
4696	5	Bécher	1093,8	1875,9	782,1	785,59	785,59	0,167
4701	5	Bécher	1093,8	1876,4	782,6	786,10	786,10	0,167
4706	5	Bécher	1093,8	1876,8	783	786,50	786,50	0,167
4711	5	Bécher	1093,8	1877,2	783,4	786,90	786,90	0,167
4716	5	Bécher	1093,8	1877,7	783,9	787,40	787,40	0,167
4721	5	Bécher	1093,8	1878,1	784,3	787,80	787,80	0,167
4726	5	Bécher	1093,8	1878,6	784,8	788,31	788,31	0,167
4731	5	Bécher	1093,8	1879,1	785,3	788,81	788,81	0,167
4736	5	Bécher	1093,8	1879,5	785,7	789,21	789,21	0,167
4741	5	Bécher	1093,8	1880	786,2	789,71	789,71	0,167

Tableau B.43 : Mesures pour l'essai de drainage de la colonne CRE-B (colonne 9-11) (suite)

4746	5	Bécher	1093,8	1880,4	786,6	790,11	790,11	0,166
4751	5	Bécher	1093,8	1880,9	787,1	790,62	790,62	0,166
4756	5	Bécher	1093,8	1881,3	787,5	791,02	791,02	0,166
4762	6	Bécher	1093,8	1881,9	788,1	791,62	791,62	0,166
4767	5	Bécher	1093,8	1882,4	788,6	792,12	792,12	0,166
4772	5	Bécher	1093,8	1882,7	788,9	792,42	792,42	0,166
4777	5	Bécher	1093,8	1883,3	789,5	793,03	793,03	0,166
4782	5	Bécher	1093,8	1883,7	789,9	793,43	793,43	0,166
4787	5	Bécher	1093,8	1884,1	790,3	793,83	793,83	0,166
4792	5	Bécher	1093,8	1884,6	790,8	794,33	794,33	0,166
4797	5	Bécher	1093,8	1885	791,2	794,73	794,73	0,166
4802	5	Bécher	1093,8	1885,5	791,7	795,24	795,24	0,166
4807	5	Bécher	1093,8	1885,8	792	795,54	795,54	0,165
4812	5	Bécher	1093,8	1886,4	792,6	796,14	796,14	0,165
4817	5	Bécher	1093,8	1886,9	793,1	796,64	796,64	0,165
4822	5	Bécher	1093,8	1887,2	793,4	796,94	796,94	0,165
4827	5	Bécher	1093,8	1887,8	794	797,55	797,55	0,165
4833	6	Bécher	1093,8	1888,3	794,5	798,05	798,05	0,165
4838	5	Bécher	1093,8	1888,6	794,8	798,35	798,35	0,165
4843	5	Bécher	1093,8	1889,2	795,4	798,95	798,95	0,165
4848	5	Bécher	1093,8	1889,6	795,8	799,36	799,36	0,165
4853	5	Bécher	1093,8	1890	796,2	799,76	799,76	0,165
4858	5	Bécher	1093,8	1890,5	796,7	800,26	800,26	0,165
4863	5	Bécher	1093,8	1891	797,2	800,76	800,76	0,165
4868	5	Bécher	1093,8	1891,4	797,6	801,16	801,16	0,165
4873	5	Bécher	1093,8	1891,8	798	801,57	801,57	0,164
4878	5	Bécher	1093,8	1892,4	798,6	802,17	802,17	0,164
4883	5	Bécher	1093,8	1892,7	798,9	802,47	802,47	0,164
4888	5	Bécher	1093,8	1893,2	799,4	802,97	802,97	0,164
4893	5	Bécher	1093,8	1893,6	799,8	803,37	803,37	0,164
4898	5	Bécher	1093,8	1894	800,2	803,78	803,78	0,164
4903	5	Bécher	1093,8	1894,6	800,8	804,38	804,38	0,164
4909	6	Bécher	1093,8	1895,1	801,3	804,88	804,88	0,164
4914	5	Bécher	1093,8	1895,5	801,7	805,28	805,28	0,164
4919	5	Bécher	1093,8	1895,9	802,1	805,68	805,68	0,164
4924	5	Bécher	1093,8	1896,4	802,6	806,19	806,19	0,164
4929	5	Bécher	1093,8	1896,8	803	806,59	806,59	0,164
4934	5	Bécher	1093,8	1897,3	803,5	807,09	807,09	0,164
4939	5	Bécher	1093,8	1897,8	804	807,59	807,59	0,164
4944	5	Bécher	1093,8	1898,1	804,3	807,89	807,89	0,163
4949	5	Bécher	1093,8	1898,6	804,8	808,40	808,40	0,163
4954	5	Bécher	1093,8	1899,1	805,3	808,90	808,90	0,163
4959	5	Bécher	1093,8	1899,4	805,6	809,20	809,20	0,163

Tableau B.44 : Mesures pour l'essai de drainage de la colonne CRE-B (colonne 9-11) (suite)

suite								
Temps (s)		# épreuve	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau (mL/s)
mesure	entre les mesures		épreuve	épreuve + eau	eau mesuré	mesuré	cumulé	
11319	5	Bécher	94,7	1196,1	1101,4	1106,32	1 106,32	0,098
11324	5	Bécher	94,7	1196,2	1101,5	1106,42	1 106,42	0,098
11329	5	Bécher	94,7	1196,4	1101,7	1106,62	1 106,62	0,098
11334	5	Bécher	94,7	1196,4	1101,7	1106,62	1 106,62	0,098
11339	5	Bécher	94,7	1196,5	1101,8	1106,72	1 106,72	0,098
11344	5	Bécher	94,7	1196,7	1102	1106,92	1 106,92	0,098
11349	5	Bécher	94,7	1196,8	1102,1	1107,02	1 107,02	0,098
11354	5	Bécher	94,7	1197	1102,3	1107,22	1 107,22	0,098
11359	5	Bécher	94,7	1197,1	1102,4	1107,33	1 107,33	0,097
11364	5	Bécher	94,7	1197,2	1102,5	1107,43	1 107,43	0,097
11369	5	Bécher	94,7	1197,4	1102,7	1107,63	1 107,63	0,097
11374	5	Bécher	94,7	1197,5	1102,8	1107,73	1 107,73	0,097
11380	6	Bécher	94,7	1197,7	1103	1107,93	1 107,93	0,097
11385	5	Bécher	94,7	1197,8	1103,1	1108,03	1 108,03	0,097
11390	5	Bécher	94,7	1197,9	1103,2	1108,13	1 108,13	0,097
11395	5	Bécher	94,7	1198,1	1103,4	1108,33	1 108,33	0,097
11400	5	Bécher	94,7	1198,2	1103,5	1108,43	1 108,43	0,097
11405	5	Bécher	94,7	1198,4	1103,7	1108,63	1 108,63	0,097
11410	5	Bécher	94,7	1198,5	1103,8	1108,73	1 108,73	0,097
11415	5	Bécher	94,7	1198,7	1104	1108,93	1 108,93	0,097
11420	5	Bécher	94,7	1198,8	1104,1	1109,03	1 109,03	0,097
11425	5	Bécher	94,7	1198,9	1104,2	1109,13	1 109,13	0,097
11430	5	Bécher	94,7	1199	1104,3	1109,23	1 109,23	0,097
11435	5	Bécher	94,7	1199,1	1104,4	1109,33	1 109,33	0,097
11440	5	Bécher	94,7	1199,2	1104,5	1109,43	1 109,43	0,097
11445	5	Bécher	94,7	1199,4	1104,7	1109,64	1 109,64	0,097
11451	6	Bécher	94,7	1199,5	1104,8	1109,74	1 109,74	0,097
11456	5	Bécher	94,7	1199,6	1104,9	1109,84	1 109,84	0,097
11461	5	Bécher	94,7	1199,7	1105	1109,94	1 109,94	0,097
11466	5	Bécher	94,7	1199,9	1105,2	1110,14	1 110,14	0,097
11471	5	Bécher	94,7	1200	1105,3	1110,24	1 110,24	0,097
11476	5	Bécher	94,7	1200,1	1105,4	1110,34	1 110,34	0,097
11481	5	Bécher	94,7	1200,3	1105,6	1110,54	1 110,54	0,097
11486	5	Bécher	94,7	1200,4	1105,7	1110,64	1 110,64	0,097
11491	5	Bécher	94,7	1200,5	1105,8	1110,74	1 110,74	0,097
11496	5	Bécher	94,7	1200,7	1106	1110,94	1 110,94	0,097
11501	5	Bécher	94,7	1200,8	1106,1	1111,04	1 111,04	0,097
11506	5	Bécher	94,7	1201	1106,3	1111,24	1 111,24	0,097
11511	5	Bécher	94,7	1201,1	1106,4	1111,34	1 111,34	0,097
11517	6	Bécher	94,7	1201,3	1106,6	1111,54	1 111,54	0,097
11522	5	Bécher	94,7	1201,3	1106,6	1111,54	1 111,54	0,096
11527	5	Bécher	94,7	1201,5	1106,8	1111,74	1 111,74	0,096
11532	5	Bécher	94,7	1201,6	1106,9	1111,85	1 111,85	0,096
11537	5	Bécher	94,7	1201,7	1107	1111,95	1 111,95	0,096
11542	5	Bécher	94,7	1201,9	1107,2	1112,15	1 112,15	0,096
11547	5	Bécher	94,7	1202	1107,3	1112,25	1 112,25	0,096

Tableau B.45 : Mesures pour l'essai de drainage de la colonne CRE-B (colonne 9-11) (suite)

suite								
Temps (s)		# éprouvette	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau (mL/s)
mesure	entre les mesures		éprouvette	éprouvette + eau	eau mesuré	mesuré	cumulé	
16390	5	Bécher	94,7	1300,1	1205,4	1210,79	1 210,79	0,074
16395	5	Bécher	94,7	1300,2	1205,5	1210,89	1 210,89	0,074
16400	5	Bécher	94,7	1300,2	1205,5	1210,89	1 210,89	0,074
16405	5	Bécher	94,7	1300,3	1205,6	1210,99	1 210,99	0,074
16410	5	Bécher	94,7	1300,4	1205,7	1211,09	1 211,09	0,074
16415	5	Bécher	94,7	1300,4	1205,7	1211,09	1 211,09	0,074
16420	5	Bécher	94,7	1300,5	1205,8	1211,19	1 211,19	0,074
16426	6	Bécher	94,7	1300,6	1205,9	1211,29	1 211,29	0,074
16431	5	Bécher	94,7	1300,7	1206	1211,39	1 211,39	0,074
16436	5	Bécher	94,7	1300,8	1206,1	1211,49	1 211,49	0,074
16441	5	Bécher	94,7	1300,9	1206,2	1211,59	1 211,59	0,074
16446	5	Bécher	94,7	1300,9	1206,2	1211,59	1 211,59	0,074
16451	5	Bécher	94,7	1301	1206,3	1211,69	1 211,69	0,074
16456	5	Bécher	94,7	1301,1	1206,4	1211,79	1 211,79	0,074
16461	5	Bécher	94,7	1301,2	1206,5	1211,89	1 211,89	0,074
16466	5	Bécher	94,7	1301,2	1206,5	1211,89	1 211,89	0,074
16471	5	Bécher	94,7	1301,3	1206,6	1211,99	1 211,99	0,074
16476	5	Bécher	94,7	1301,4	1206,7	1212,09	1 212,09	0,074
16481	5	Bécher	94,7	1301,5	1206,8	1212,19	1 212,19	0,074
16486	5	Bécher	94,7	1301,5	1206,8	1212,19	1 212,19	0,074
16491	5	Bécher	94,7	1301,6	1206,9	1212,29	1 212,29	0,074
16496	5	Bécher	94,7	1301,7	1207	1212,39	1 212,39	0,073
16502	6	Bécher	94,7	1301,8	1207,1	1212,49	1 212,49	0,073
16507	5	Bécher	94,7	1301,9	1207,2	1212,59	1 212,59	0,073
16512	5	Bécher	94,7	1302	1207,3	1212,69	1 212,69	0,073
16517	5	Bécher	94,7	1302	1207,3	1212,69	1 212,69	0,073
16522	5	Bécher	94,7	1302,1	1207,4	1212,79	1 212,79	0,073
16527	5	Bécher	94,7	1302,3	1207,6	1213,00	1 213,00	0,073
16532	5	Bécher	94,7	1302,4	1207,7	1213,10	1 213,10	0,073
16537	5	Bécher	94,7	1302,4	1207,7	1213,10	1 213,10	0,073
16542	5	Bécher	94,7	1302,5	1207,8	1213,20	1 213,20	0,073
16547	5	Bécher	94,7	1302,6	1207,9	1213,30	1 213,30	0,073
16552	5	Bécher	94,7	1302,6	1207,9	1213,30	1 213,30	0,073
16557	5	Bécher	94,7	1302,7	1208	1213,40	1 213,40	0,073
16562	5	Bécher	94,7	1302,8	1208,1	1213,50	1 213,50	0,073
16568	6	Bécher	94,7	1302,9	1208,2	1213,60	1 213,60	0,073
16573	5	Bécher	94,7	1303	1208,3	1213,70	1 213,70	0,073
16578	5	Bécher	94,7	1303,1	1208,4	1213,80	1 213,80	0,073
16583	5	Bécher	94,7	1303,2	1208,5	1213,90	1 213,90	0,073
16588	5	Bécher	94,7	1303,2	1208,5	1213,90	1 213,90	0,073
16593	5	Bécher	94,7	1303,2	1208,5	1213,90	1 213,90	0,073
16598	5	Bécher	94,7	1303,4	1208,7	1214,10	1 214,10	0,073
16603	5	Bécher	94,7	1303,5	1208,8	1214,20	1 214,20	0,073
16608	5	Bécher	94,7	1303,5	1208,8	1214,20	1 214,20	0,073
16613	5	Bécher	94,7	1303,6	1208,9	1214,30	1 214,30	0,073
16618	5	Bécher	94,7	1303,7	1209	1214,40	1 214,40	0,073

Tableau B.46 : Mesures pour l'essai de drainage de la colonne CRE-B (colonne 9-11) (suite)

suite								
Temps (s)		# éprouvette	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau (mL/s)
mesure	entre les mesures		éprouvette	éprouvette + eau	eau mesuré	mesuré	cumulé	
21791	5	Bécher	94,7	1370,2	1275,5	1281,20	1 281,20	0,059
21796	5	Bécher	94,7	1370,3	1275,6	1281,30	1 281,30	0,059
21801	5	Bécher	94,7	1370,3	1275,6	1281,30	1 281,30	0,059
21806	5	Bécher	94,7	1370,4	1275,7	1281,40	1 281,40	0,059
21811	5	Bécher	94,7	1370,5	1275,8	1281,50	1 281,50	0,059
21816	5	Bécher	94,7	1370,5	1275,8	1281,50	1 281,50	0,059
21821	5	Bécher	94,7	1370,6	1275,9	1281,60	1 281,60	0,059
21826	5	Bécher	94,7	1370,7	1276	1281,70	1 281,70	0,059
21831	5	Bécher	94,7	1370,7	1276	1281,70	1 281,70	0,059
21837	6	Bécher	94,7	1370,7	1276	1281,70	1 281,70	0,059
21842	5	Bécher	94,7	1370,8	1276,1	1281,80	1 281,80	0,059
21847	5	Bécher	94,7	1370,8	1276,1	1281,80	1 281,80	0,059
21852	5	Bécher	94,7	1370,9	1276,2	1281,90	1 281,90	0,059
21857	5	Bécher	94,7	1371	1276,3	1282,00	1 282,00	0,059
21862	5	Bécher	94,7	1371	1276,3	1282,00	1 282,00	0,059
21867	5	Bécher	94,7	1371,1	1276,4	1282,10	1 282,10	0,059
21872	5	Bécher	94,7	1371,2	1276,5	1282,20	1 282,20	0,059
21877	5	Bécher	94,7	1371,2	1276,5	1282,20	1 282,20	0,059
21882	5	Bécher	94,7	1371,2	1276,5	1282,20	1 282,20	0,059
21887	5	Bécher	94,7	1371,3	1276,6	1282,30	1 282,30	0,059
21892	5	Bécher	94,7	1371,3	1276,6	1282,30	1 282,30	0,059
21897	5	Bécher	94,7	1371,4	1276,7	1282,40	1 282,40	0,059
21902	5	Bécher	94,7	1371,5	1276,8	1282,50	1 282,50	0,059
21908	6	Bécher	94,7	1371,5	1276,8	1282,50	1 282,50	0,059
21913	5	Bécher	94,7	1371,6	1276,9	1282,60	1 282,60	0,059
21918	5	Bécher	94,7	1371,7	1277	1282,71	1 282,71	0,059
21923	5	Bécher	94,7	1371,7	1277	1282,71	1 282,71	0,059
21928	5	Bécher	94,7	1371,7	1277	1282,71	1 282,71	0,058
21933	5	Bécher	94,7	1371,8	1277,1	1282,81	1 282,81	0,058
21938	5	Bécher	94,7	1371,8	1277,1	1282,81	1 282,81	0,058
21943	5	Bécher	94,7	1371,9	1277,2	1282,91	1 282,91	0,058
21948	5	Bécher	94,7	1372	1277,3	1283,01	1 283,01	0,058
21953	5	Bécher	94,7	1372	1277,3	1283,01	1 283,01	0,058
21958	5	Bécher	94,7	1372,1	1277,4	1283,11	1 283,11	0,058
21963	5	Bécher	94,7	1372,2	1277,5	1283,21	1 283,21	0,058
21968	5	Bécher	94,7	1372,2	1277,5	1283,21	1 283,21	0,058
21974	6	Bécher	94,7	1372,3	1277,6	1283,31	1 283,31	0,058
21979	5	Bécher	94,7	1372,2	1277,5	1283,21	1 283,21	0,058
21984	5	Bécher	94,7	1372,3	1277,6	1283,31	1 283,31	0,058
21989	5	Bécher	94,7	1372,4	1277,7	1283,41	1 283,41	0,058
21994	5	Bécher	94,7	1372,5	1277,8	1283,51	1 283,51	0,058
21999	5	Bécher	94,7	1372,5	1277,8	1283,51	1 283,51	0,058
22004	5	Bécher	94,7	1372,5	1277,8	1283,51	1 283,51	0,058
22009	5	Bécher	94,7	1372,6	1277,9	1283,61	1 283,61	0,058
22014	5	Bécher	94,7	1372,6	1277,9	1283,61	1 283,61	0,058
22019	5	Bécher	94,7	1372,7	1278	1283,71	1 283,71	0,058
22024	5	Bécher	94,7	1372,8	1278,1	1283,81	1 283,81	0,058
22029	5	Bécher	94,7	1372,9	1278,2	1283,91	1 283,91	0,058

Tableau B.47 : Mesures pour l'essai de drainage de la colonne CRE-B (colonne 9-11) (suite)

suite								
Temps (s)		# éprouvette	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau (mL/s)
mesure	entre les mesures		éprouvette	éprouvette + eau	eau mesuré	mesuré	cumulé	
23322	5	Bécher	94,7	1386,9	1292,2	1297,97	1 297,97	0,056
23328	6	Bécher	94,7	1386,9	1292,2	1297,97	1 297,97	0,056
23333	5	Bécher	94,7	1386,9	1292,2	1297,97	1 297,97	0,056
23338	5	Bécher	94,7	1387	1292,3	1298,07	1 298,07	0,056
23343	5	Bécher	94,7	1387	1292,3	1298,07	1 298,07	0,056
23348	5	Bécher	94,7	1387,1	1292,4	1298,17	1 298,17	0,056
23353	5	Bécher	94,7	1387,1	1292,4	1298,17	1 298,17	0,056
23358	5	Bécher	94,7	1387,2	1292,5	1298,27	1 298,27	0,056
23363	5	Bécher	94,7	1387,2	1292,5	1298,27	1 298,27	0,056
23368	5	Bécher	94,7	1387,3	1292,6	1298,37	1 298,37	0,056
23373	5	Bécher	94,7	1387,4	1292,7	1298,48	1 298,48	0,056
23378	5	Bécher	94,7	1387,4	1292,7	1298,48	1 298,48	0,056
23383	5	Bécher	94,7	1387,4	1292,7	1298,48	1 298,48	0,056
23388	5	Bécher	94,7	1387,4	1292,7	1298,48	1 298,48	0,056
23393	5	Bécher	94,7	1387,5	1292,8	1298,58	1 298,58	0,056
23399	6	Bécher	94,7	1387,5	1292,8	1298,58	1 298,58	0,055
23404	5	Bécher	94,7	1387,6	1292,9	1298,68	1 298,68	0,055
23409	5	Bécher	94,7	1387,7	1293	1298,78	1 298,78	0,055
23414	5	Bécher	94,7	1387,7	1293	1298,78	1 298,78	0,055
23419	5	Bécher	94,7	1387,7	1293	1298,78	1 298,78	0,055
25200	1781	Bécher	94,7	1402,6	1307,9	1313,74	1 313,74	0,052
27000	1800	Bécher	94,7	1417,5	1322,8	1328,71	1 328,71	0,049
28800	1800	Bécher	94,7	1431,1	1336,4	1342,37	1 342,37	0,047
30600	1800	Bécher	94,7	1443,4	1348,7	1354,73	1 354,73	0,044
32400	1800	Bécher	94,7	1455,1	1360,4	1366,48	1 366,48	0,042
34200	1800	Bécher	94,7	1465,6	1370,9	1377,02	1 377,02	0,040
36000	1800	Bécher	94,7	1475,5	1380,8	1386,97	1 386,97	0,039
37800	1800	Bécher	94,7	1484,8	1390,1	1396,31	1 396,31	0,037
39600	1800	Bécher	94,7	1493,5	1398,8	1405,05	1 405,05	0,035
41400	1800	Bécher	94,7	1501,2	1406,5	1412,78	1 412,78	0,034
43200	1800	Bécher	94,7	1506,5	1411,8	1418,11	1 418,11	0,033
46800	3600	Bécher	94,7	1521,1	1426,4	1432,77	1 432,77	0,031
47400	600	Bécher	94,7	1523,9	1429,2	1435,59	1 435,59	0,030
50400	3000	Bécher	94,7	1533,6	1438,9	1445,33	1 445,33	0,029
54000	3600	Bécher	94,7	1543	1448,3	1454,77	1 454,77	0,027
57600	3600	Bécher	94,7	1553,9	1459,2	1465,72	1 465,72	0,025
61200	3600	Bécher	94,7	1564,2	1469,5	1476,07	1 476,07	0,024
64800	3600	Bécher	94,7	1572,3	1477,6	1484,20	1 484,20	0,023
68400	3600	Bécher	94,7	1578,8	1484,1	1490,73	1 490,73	0,022
72000	3600	Bécher	94,7	1583,3	1488,6	1495,25	1 495,25	0,021
75600	3600	Bécher	94,7	1589,2	1494,5	1501,18	1 501,18	0,020
79200	3600	Bécher	94,7	1595,3	1500,6	1507,30	1 507,30	0,019
84600	5400	Bécher	94,7	1603,8	1509,1	1515,84	1 515,84	0,018
86400	1800	Bécher	94,7	1607,4	1512,7	1519,46	1 519,46	0,018
90000	3600	Bécher	94,7	1614,1	1519,4	1526,19	1 526,19	0,017
93600	3600	Bécher	94,7	1620,1	1525,4	1532,21	1 532,21	0,016
97200	3600	Bécher	94,7	1625,6	1530,9	1537,74	1 537,74	0,016
97800	600	Bécher	94,7	1626,6	1531,9	1538,74	1 538,74	0,016
100800	3000	Bécher	94,7	1630,7	1536	1542,86	1 542,86	0,015
106200	5400	Bécher	94,7	1637,5	1542,8	1549,69	1 549,69	0,015

Tableau B.48 : Mesures pour l'essai de drainage de la colonne CRE-B (colonne 9-11) (suite)

<i>suite</i>								
Temps (s)		# éprouvette	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau (mL/s)
mesure	entre les mesures		éprouvette	éprouvette + eau	eau mesuré	mesuré	cumulé	
108000	1800	Bécher	94,7	1639,7	1545	1551,90	1 551,90	0,014
111600	3600	Bécher	94,7	1643,6	1548,9	1555,82	1 555,82	0,014
112200	600	Bécher	94,7	1644,2	1549,5	1556,42	1 556,42	0,014
171000	58800	Bécher	94,7	1685,6	1590,9	1598,01	1 598,01	0,009
172380	1380	Bécher	94,7	1686,4	1591,7	1598,81	1 598,81	0,009
172800	420	Bécher	94,7	1686,6	1591,9	1599,01	1 599,01	0,009
187060	14260	Bécher	94,7	1693	1598,3	1605,44	1 605,44	0,009
290665	103605	Bécher	94,7	1715,9	1621,2	1628,44	1 628,44	0,006
378360	87695	Bécher	94,7	1728,3	1633,6	1640,90	1 640,90	0,004
432840	54480	Bécher	94,7	1731,3	1636,6	1643,91	1 643,91	0,004
443700	10860	Bécher	94,7	1731,4	1636,7	1644,01	1 644,01	0,004
628500	184800	Bécher	94,7	1733,1	1638,4	1645,72	1 645,72	0,003

Démontage colonnes

Tableau B.49 : Données de démontage de la colonne CRE-A (5-6)

Démontage colonne CRE									
Mine Lac Tio Anorthosite tamisée à 0-10mm (échantillon été 2013)									
Colonnes #	5-6 (colonne 2)								
Test #	CRE - A								
Date:	8 aout 2014								
Participants:	J Goyer S Letourneur I Levesque								
temps début de la couche	poids/hauteur apres que la couche soit enlevée								
Temps (hh:mm:ss)	Niveau/couche	Poids colonne (kg)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	H5 (mm)	Profondeur centre couche (mm)	Épaisseur couche (mm)
00:00:00	Intact	76,542	0	0	0	0	0,00	0,00	
	Plaque perforée	74,448	24,79	24,35	22,45	23,28	23,47	11,83	23,67
	Géotextile	74,29	39,58	39,73	38,39	39,11	37,78	31,29	15,25
	Surface sol	74,284	41,01	40,19	39,55	39,13	39,34	39,38	0,93
00:21:30	couche 1	72,69	93,24	81,5	86,51	91,23	88,75	64,05	48,40

Tableau B.50 : Données de démontage de la colonne CRE-A (5-6) (suite)

temps début de la couche		poids/hauteur apres que la couche soit enlevée								
Temps (hh:mm:ss)	Niveau/couche	Poids colonne (kg)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	H5 (mm)	Profondeur centre couche (mm)	Épaisseur couche (mm)	Profondeur bas de la couche à partir du dessus du sol (mm)
00:29:40	couche 2	71,144	136,3	133,58	127,65	133,25	133,05	110,51	44,52	92,92
00:36:45	couche 3	69,502	167,68	178,06	179,67	179,95	172,73	154,19	42,85	135,77
00:44:00	couche 4	67,644	232,27	226,57	227,27	230,72	228,37	202,33	53,42	189,20
00:50:20	couche 5	66,098	273,36	268,72	275,88	275,17	268,21	250,65	43,23	232,42
00:55:35	couche 6	64,298	315	315	318	318	318,00	294,53	44,53	276,96
01:01:45	couche 7	62,7	361	359	355	366	357,00	338,20	42,80	319,76
01:06:35	couche 8	61,178	406	397	396	404	399,00	380,00	40,80	360,56
01:11:00	couche 9	59,3	454	448	451	455	447,00	425,70	50,60	411,16
01:16:00	couche 10	57,66	497	497	496	490	495,00	473,00	44,00	455,16
01:21:00	couche 11	55,492	561	553	552	551	553,00	524,50	59,00	514,16
01:25:00	couche 12	53,352	611	608	603	618	607,00	581,70	55,40	569,56
01:29:00	couche 13	51,286	671	666	660	668	664,00	637,60	56,40	625,96
01:41:30	couche 14	37,734	96,75	98,91	97,32	93,42	95,05	689,93	48,25	674,21
01:45:15	couche 15	35,574	158,74	154,11	151,55	156,11	150,77	718,91	57,97	732,18
01:49:00	couche 16	33,29	223,79	223,01	210,7	219,45	216,32	751,11	64,40	796,57
01:52:15	couche 17	31,312	271,38	283,91	271,61	273,27	266,50	778,45	54,68	851,25
01:55:45	couche 18	28,664	336	336	338	339	335,00	810,18	63,47	914,72
02:01:00	couche 19	26,688	386	388	384	384	388,00	834,78	49,20	963,92

Tableau B.51 : Données de démontage de la colonne CRE-A (5-6) (suite)

Temps (hh:mm:ss)	Niveau/couche	Poids colonne (kg)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	H5 (mm)	Profondeur centre couche (mm)	Épaisseur couche (mm)	Profondeur bas de la couche à partir du dessus du sol (mm)
02:03:45	couche 20	25,454	423	416	417	417	420,00	851,08	32,60	996,52
(pause midi) 3:36:10	couche 21	23,498	475	465	468	468	474,00	876,78	51,40	1047,92
03:38:30	couche 22	22,166	514	500	508	509	508,00	895,68	37,80	1085,72
03:40:15	couche 23	20,818	540	536	544	537	546,00	912,08	32,80	1118,52
03:42:15	couche 24	19,632	580	570	568	575	570,00	928,08	32,00	1150,52
03:44:25	couche 25	18,04	610	610	610	611	610,00	946,88	37,60	1188,12
	sans geotextile	17,992	612	608	610	612	607,00	946,68	-0,40	1187,72
	sans plaque	17,892	619	619	619	619	618,00	951,18		

Tableau B.52 : Données de démontage de la colonne CRE-A (5-6) (suite)

Niveau/couche	Masse tare (g)	Masse tare + sol (g)	Masse tare + sol sec (g)
couche 1	105,3	1162,4	1124,9
couche 2	119,6	1127,1	1088
couche 3	124,5	1224,2	1179,9
couche 4	126,9	1414,4	1360,4
couche 5	121,1	1266,8	1217,1
couche 6	126,9	1195,7	1149,5
couche 7	133,6	1169,2	1123,3
couche 8	131,2	1146,8	1100,4
couche 9	92,8	853,1	817,5
couche 10	174,5	1179,3	1131,7
couche 11	126,8	985,4	944,8
couche 12	129,4	1133	1085,8
couche 13	11,1	827	786,9
couche 14	11,3	838,1	797,7
couche 15	11,2	827,3	785,4
couche 16	11,5	768,3	724,3
couche 17	11,6	820,5	768,8
couche 18	167,3	2796,6	2604,4
couche 19	909,5	2880,3	2719
couche 20	169,5	1399,9	1298,6
couche 21	320,9	2272	2111
couche 22	174,3	1502,9	1390,4
couche 23	103,4	1448,1	1330,6
couche 24	866,1	2061,7	1954,5
couche 25	869,4	2447,5	2304,7

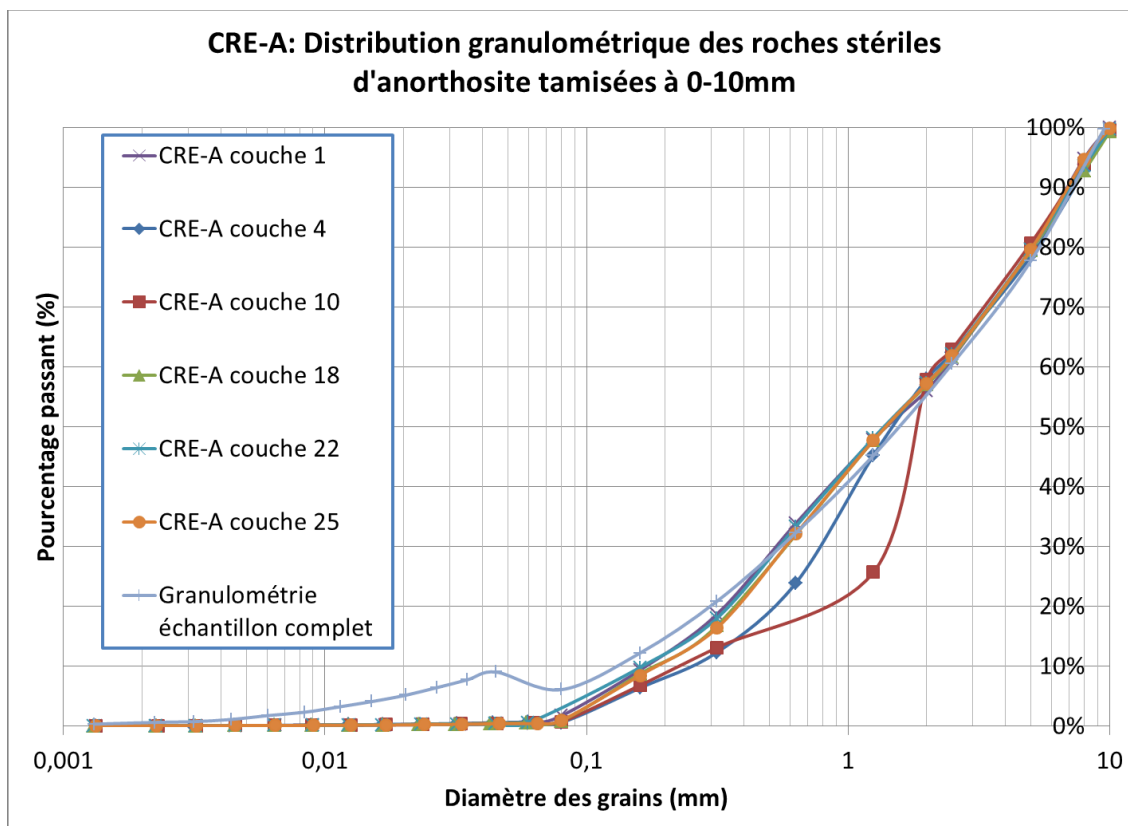


Figure B.8 : Distribution granulométrique des couches de matériau au démontage de la colonne A.

Tableau B.53 : Données de démontage de la colonne CRE-B (9-11)

Démontage colonne CRE										
Mine Lac Tio Anorthosite tamisée à 0-10mm (échantillon été 2013)										
Colonnes #		9-11 (colonne 1)								
Test #		CRE - B								
Date:		12 aout 2014								2,146
Participants:		J Goyer S Letourneur I Levesque								
temps début de la couche		poids/hauteur apres que la couche soit enlevée								
Temps (hh:mm:ss)	Niveau/couche	Poids colonne (kg)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	H5 (mm)	Moyenne profondeur couche (mm)	Profondeur centre couche (mm)	Épaisseur couche (mm)
00:00:00	Intact	75,214	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	
	Plaque perforée	73,216	20,01	16,06	20,2	18,29	19,92	18,90	9,45	18,90
	Géotextile	73,124	28,37	25,38	29,51	28,21	29,22	28,14	23,52	9,24
	Surface sol	73,116	31,95	27,47	32,03	27,96	30,31	29,94	29,04	1,81

Tableau B.54 : Données de démontage de la colonne CRE-B (9-11) (suite)

temps début de la couche		poids/hauteur apres que la couche soit enlevée								
Temps (hh:mm:ss)	Niveau/couche	Poids colonne (kg)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	H5 (mm)	Moyenne profondeur couche (mm)	Profondeur centre couche (mm)	Épaisseur couche (mm)
00:15:30	couche 1	71,12	89,37	90,35	89,55	90,24	88,70	89,64	59,79	59,70
00:21:45	couche 2	69,574	139,24	136,34	135,66	135,6	132,99	135,97	112,80	46,32
00:25:35	couche 3	68,094	183,14	175,57	177,58	174,58	171,46	176,47	156,22	40,50
00:30:10	couche 4	66,784	217,04	217,28	214,33	206,94	212,14	213,55	195,01	37,08
00:35:10	couche 5	65,182	260,81	255,09	259,06	253,97	254,00	256,59	235,07	43,04
00:39:40	couche 6	63,426	306,4	306	305,6	307,42	298,90	304,86	280,73	48,28
00:43:50	couche 7	62,132	340	338	330	342	334,00	336,80	320,83	31,94
00:49:00	couche 8	60,546	387	374	375	380	372,00	377,60	357,20	40,80
00:58:00	couche 9	58,668	437	433	433	440	424,00	433,40	405,50	55,80
01:02:50	couche 10	57,168	475	474	472	478	477,00	475,20	454,30	41,80
01:06:30	couche 11	55,184	537	532	528	533	530,00	532,00	503,60	56,80
01:11:20	couche 12	52,99	596	593	589	596	584,00	591,60	561,80	59,60
01:16:20	couche 13	50,942	651	646	643	653	645,00	647,60	619,60	56,00
01:19:45	couche 14	48,834	710	712	701	713	698	706,80	677,20	59,20

Tableau B.55 : Données de démontage de la colonne CRE-B (9-11) (suite)

temps début de la couche		poids/hauteur apres que la couche soit enlevée								
Temps (hh:mm:ss)	Niveau/couche	Poids colonne (kg)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	H5 (mm)	Moyenne profondeur couche (mm)	Profondeur centre couche (mm)	Épaisseur couche (mm)
01:30:25	couche 15	34,754	137,78	134,99	130,7	126,36	132,47	755,64	731,22	48,84
01:32:05	couche 16	32,754	188,52	190,89	188,17	185,01	192,02	812,10	759,45	56,46
01:35:40	couche 17	30,63	250,73	249,92	246,73	250,12	243,76	871,43	789,12	59,33
01:39:30	couche 18	28,622	301,01	303,9	304,82	304,74	303,76	926,83	816,81	55,39
01:42:00	couche 19	27,356	331	324	329	322	329,00	950,18	828,49	23,35
01:44:00	couche 20	25,928	362	362	355	355	370,00	983,98	845,39	33,80
01:47:30	couche 21	24,634	401	399	397	399	399,00	1022,18	864,49	38,20
01:49:25	couche 22	23	436	436	437	445	440,00	1061,98	884,39	39,80
01:51:40	couche 23	21,534	482	480	475	474	481,00	1101,58	904,19	39,60
01:54:00	couche 24	19,844	521	524	519	526	521,00	1145,38	926,09	43,80
01:58:45	couche 25	18,164	565	570	560	566	568,00	1188,98	947,89	43,60
02:01:00	couche 26	16,622	607	607	603	601	609,00	1228,58	967,69	39,60
02:03:15	couche 27	16,452	610	610	608	609	608,00	1232,18	969,49	3,60
	sans geotextile	16,404	612	612	612	610	613,00	1234,98	970,89	2,80
	montage complet sans sol	30,816								
	balance vide	0,054								

Tableau B.56 : Données de démontage de la colonne CRE-B (9-11) (suite)

Niveau/couche	Masse tare (g)	Masse tare + sol (g)	Masse tare + sol sec (g)
couche 1	592,2	2585,7	2516,9
couche 2	169,4	1434,4	1387,7
couche 3	103,5	1176,6	1134,8
couche 4	898,6	2205,5	2155
couche 5	129,2	1278,6	1233,1
couche 6	11,3	985,9	946,5
couche 7	11,5	788,2	755,4
couche 8	11,3	985,5	944,3
couche 9	11,3	821,9	787,3
couche 10	230,6	1726,8	1661,5
couche 11	11,5	924,8	884,5
couche 12	130,9	1595,6	1527,6
couche 13	120,9	918,3	881,5
couche 14	105,2	1061,6	1016,9

Tableau B.57 : Données de démontage de la colonne CRE-B (9-11) (suite)

Niveau/couche	Masse tare (g)	Masse tare + sol (g)	Masse tare + sol sec (g)
couche 15	124,3	839,7	804,2
couche 16	119,7	1040,7	990
couche 17	133,7	1119,8	1055,6
couche 18	237,3	2240,7	2074,9
couche 19	126,5	1309,8	1283,3
couche 20	174,9	1595,9	1465,2
couche 21	127,5	1417,4	1299,6
couche 22	671,8	2301,4	2146
couche 23	153,2	1616,7	1469,4
couche 24	127,1	1812,3	1646,4
couche 25	321,1	1997,7	1834,6
couche 26	175	1714,7	1571,6
couche 27	167,9	335,9	317,3

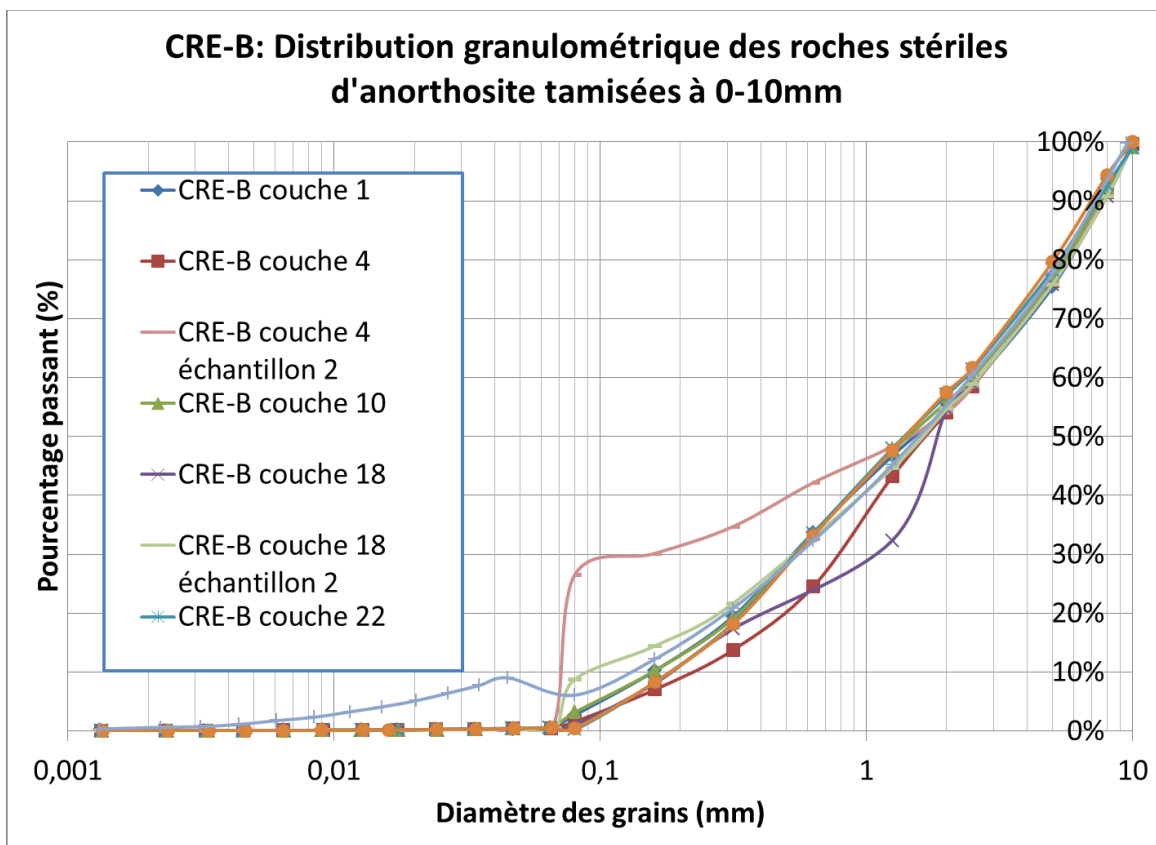


Figure B.9 : Distribution granulométrique des couches du matériau au démontage de la colonne B.

ANNEXE C – CALIBRATION DES INSTRUMENTS

C.

Calibration des sondes diélectriques

Procédure de calibration des instruments de teneur en eau volumique (Decagon)

Étendue et application

Le but de cette procédure est de fournir un encadrement pour effectuer la calibration des sondes diélectriques EC-5, 5TM et GS3 pour mesurer les paramètres de teneur en eau et de température du matériau granulaire testé. Cette procédure ne remplace pas les procédures établies par le fournisseur des sondes (dans ce cas-ci Decagon), mais ce veut être un complément.

Les sondes doivent être équipés d'un capteur de données et d'un accumulateur de données (ordinateur) afin de pouvoir compiler les données.

Santé et sécurité

Il est important de respecter les règlements en matière de santé et sécurité établis dans le laboratoire en tout temps. Les procédures et mesures de sécurité indiquées par le fournisseur doivent être appliquées en tout temps.

Général

Avant d'effectuer la calibration, tous les instruments à être calibrés doivent être stabilisés (laissé à l'air libre) en fonction des spécifications du fournisseur. Avant d'entreprendre les essais, tous les instruments doivent être propres, et les connexions entre les sondes, le capteur de données et l'accumulateur de données doivent être vérifiées. Le volume de la solution/matériau utilisée pour calibrer les sondes doit être au moins celui du rayon de captage des instruments. Dans ce cas-ci, les sondes ont un rayon d'influence de 2 cm de diamètre, donc il doit y avoir au moins 2 cm entre chacun des capteurs et les parois du récipient. Ne jamais retirer une sonde enfouie dans le matériau en tirant sur le câble, car la connexion entre le câble et la sonde pourrait être endommagée.

Préparation de l'échantillon

Préparer un échantillon de sol humide et remplir un récipient d'au moins 4L. Mélanger l'échantillon avec une grosse cuillère ou pelle et mettre le couvercle pour mélanger encore en évitant la ségrégation des particules. Mélanger encore avec la cuillère et s'assurer que la surface de l'échantillon est à peu près plane.

Essais avec les sondes

Chacune des sondes doit être testé un par un dans un récipient contenant l'échantillon. Les sondes seront insérées à tour de rôle au centre du récipient.

Position des sondes

Les sondes doivent être positionnées verticalement. Il doit y avoir environ 5cm entre chaque sonde et les parois du récipient et 1cm avec le bout de la sonde et le récipient. Lorsqu'une sonde est insérée le matériau l'entourant doit être remplacé avec la cuillère pour s'assurer que la sonde est complètement couverte. La sonde doit être enlevée et remplacé pour chaque lecture. À chaque fois que la sonde est enlevée, le matériau doit être mélangé. Chaque sonde doit être enlevée et remplacée dans le récipient 5 fois.

Connexion avec le capteur de données (ECH2O)

Le capteur de données utilisé est le Em50. Avant de débiter les essais, il faut s'assurer que les batteries fonctionnent (peser sur 'reset', la lumière 'status' devrait être verte), que la connexion avec le câble entre le Em50 et l'ordinateur se fait bien. Entrer dans l'ordinateur (Utilisateur étudiant, mot de passe : etud1ant) et démarrer le logiciel ECH₂OUtility. Sélectionner 'Connect'. Sélection chaque sonde (sensor type) en fonction de la sonde connecté au port choisi.

Enregistrement avec l'accumulateur de données

Une fois que la sonde est placé dans l'échantillon et que le capteur de données est activé, sélectionner 'scan'. Attendre au moins une minute avant de refaire 'scan' et vérifier que les données sont les même que lors du premier 'scan', sinon, attendre une autre minute et resélectionner 'scan'.

Essais au laboratoire

Prendre un cylindre noir et mesurer le volume avec de l'eau en prenant soin de mesurer aussi la température de l'eau. Calculer le volume du cylindre.

À la fin des essais de calibration avec les sondes prendre une cuillère pour mettre une partie de l'échantillon dans le cylindre noir (environ 1kg selon ASTM D2216). Égaliser la surface avec une règle. Peser le cylindre avec le sol. Ensuite, peser un récipient allant au four. Transférer le sol dans le moule dans le récipient allant au four et peser le récipient avec le sol. Mettre au four 12 heures. Sortir du four et laisser reposer à l'air ambiant jusqu'à ce qu'il ait atteint la température de la pièce. Peser l'échantillon sec.

Gestion des données et des enregistrements

Toutes les données obtenues doivent être documentées dans le cahier/fichier du projet sur une feuille Excel (voir exemple). Au minimum, inclure les informations suivantes :

- Fournisseur
- Numéro du modèle
- Numéro de série
- Numéro d'identification de la sonde
- Précision de la sonde
- Résolution de la sonde
- Étendue des mesures pouvant être enregistrées par la sonde
- La procédure utilisée pour la calibration
- La date de la calibration
- Les lectures de la sonde
- Nom de la/les personne(s) qui a(ont) fait les essais

Tableau C.1 : Courbes de calibration des sondes Decagon EC-5, 5TM et GS-3

Courbes de calibration des sondes Decagon EC-5, 5TM et GS-3

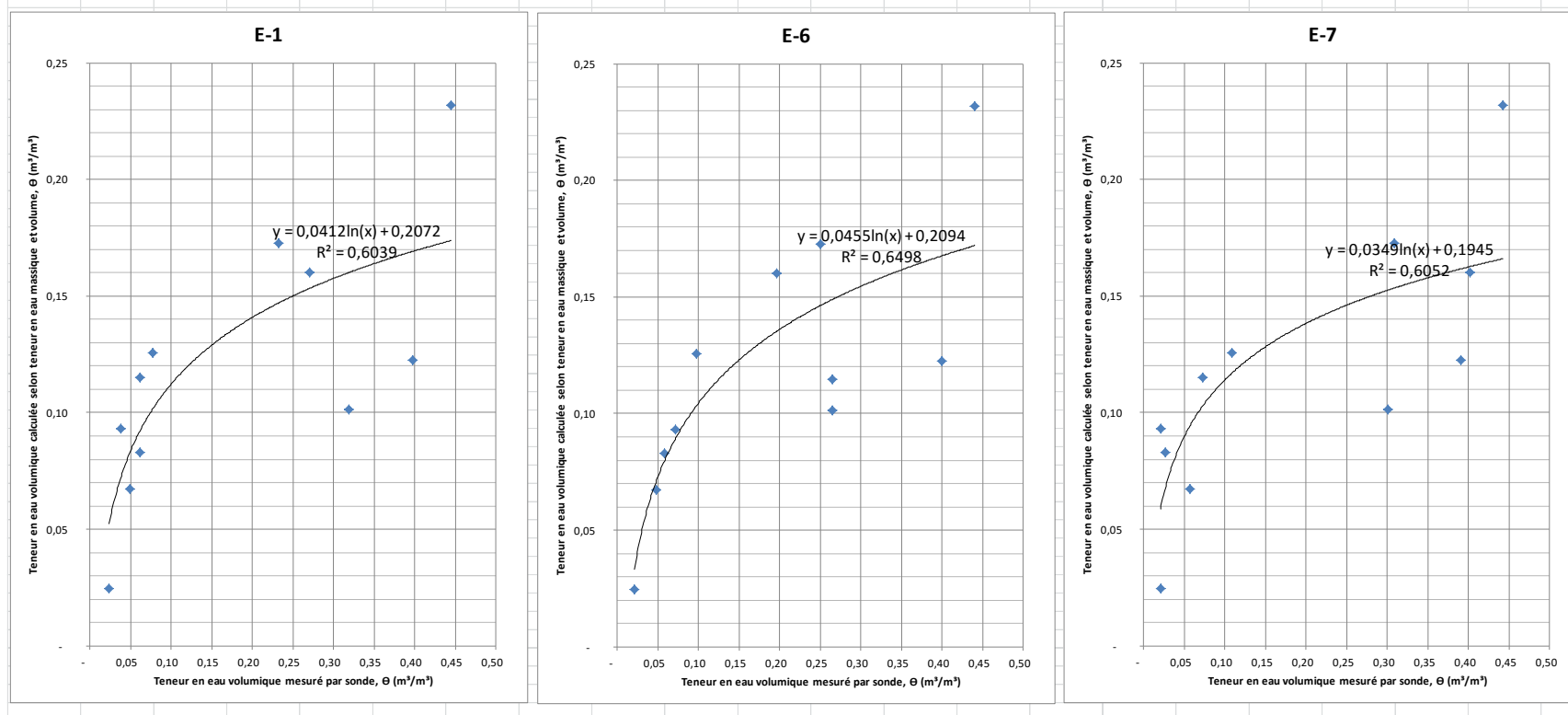


Tableau C.2 : Courbes de calibration des sondes Decagon EC-5, 5TM et GS-3 (suite)

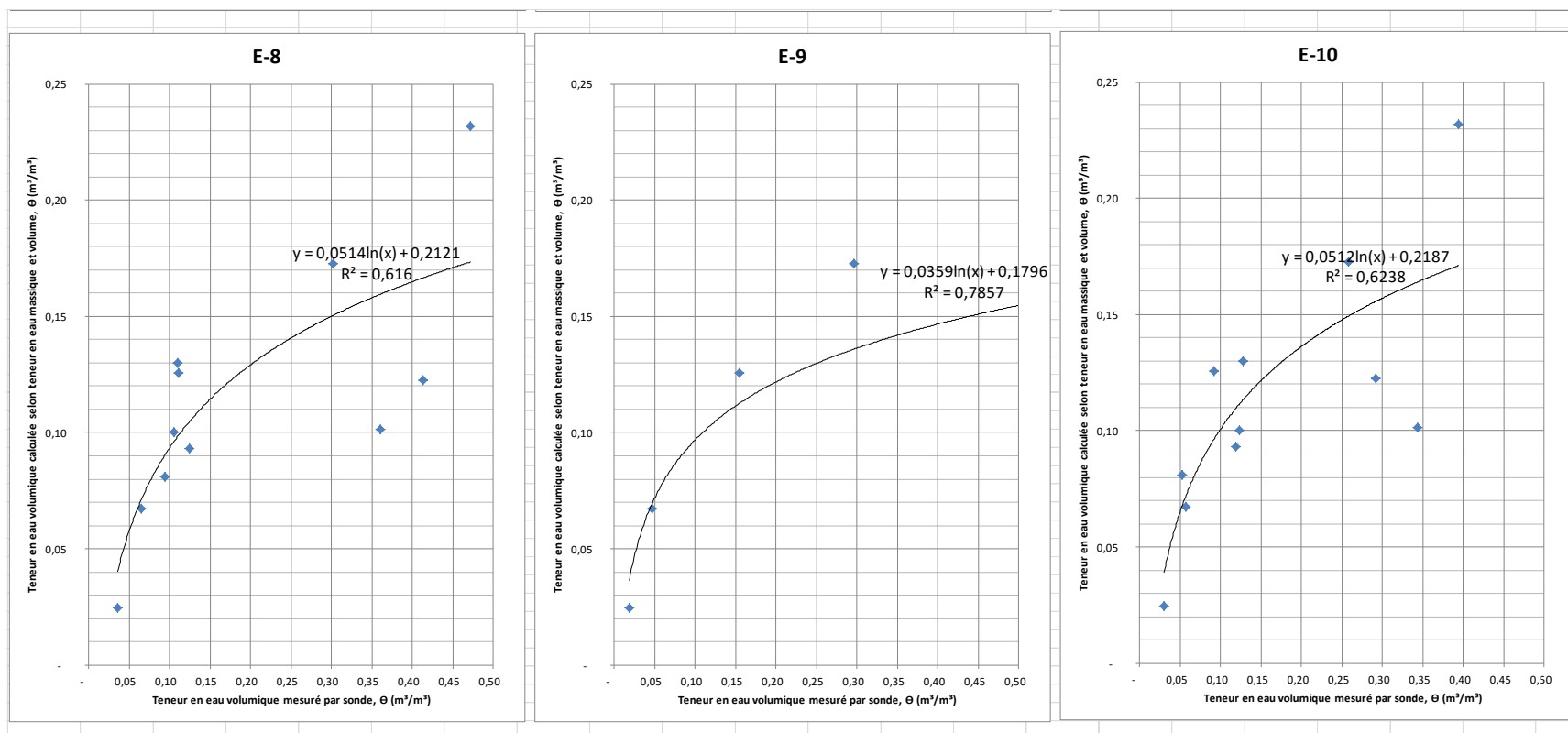


Tableau C.3 : Courbes de calibration des sondes Decagon EC-5, 5TM et GS-3 (suite)

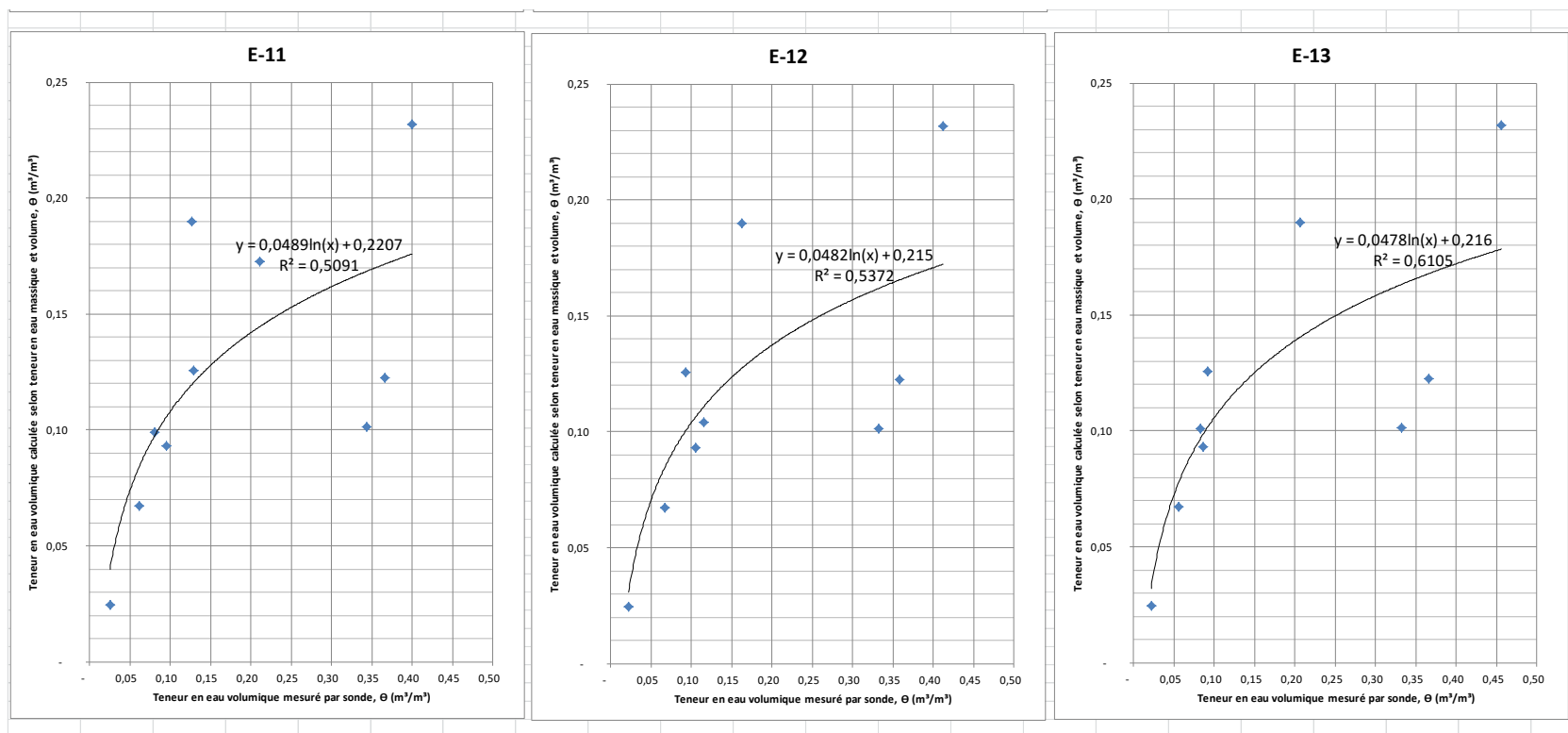


Tableau C.4 : Courbes de calibration des sondes Decagon EC-5, 5TM et GS-3 (suite)

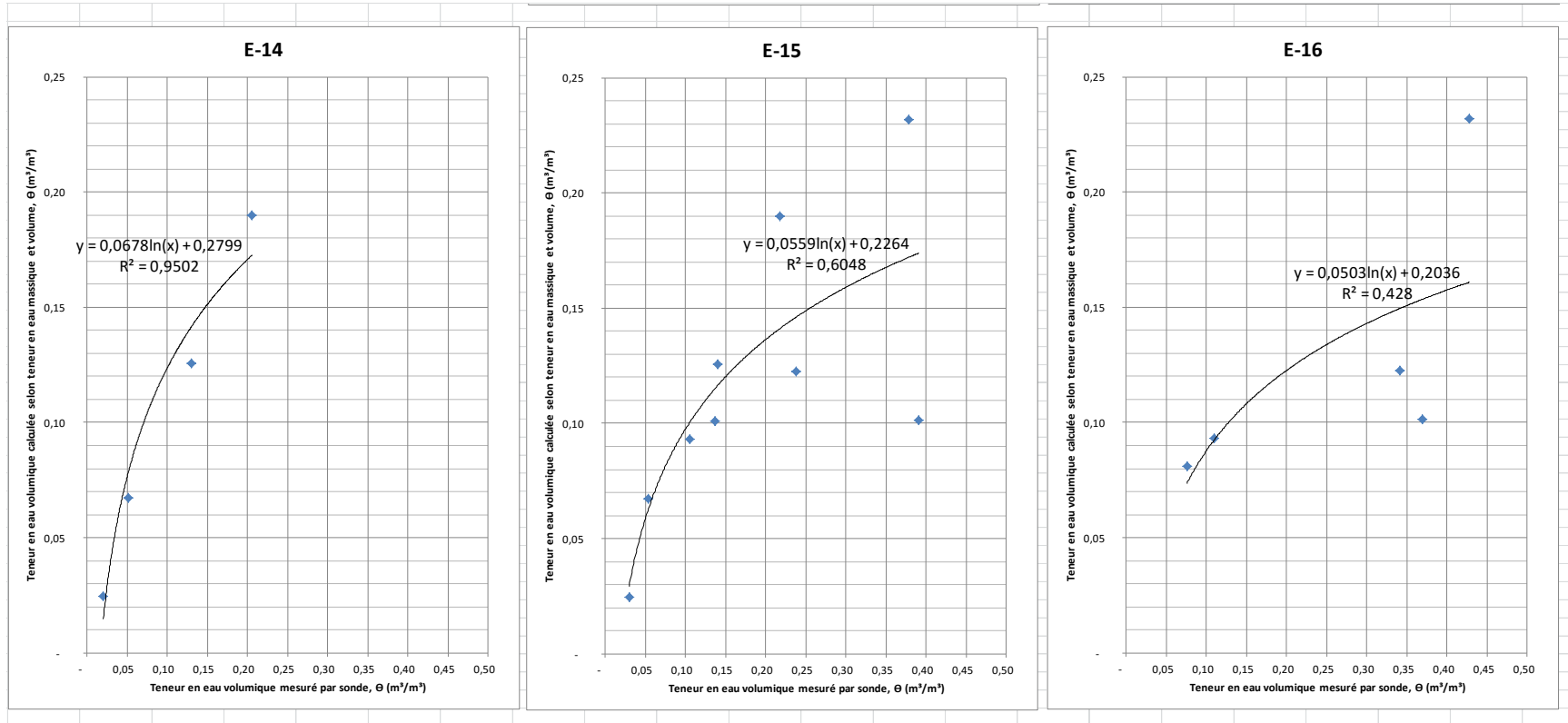


Tableau C.5 : Courbes de calibration des sondes Decagon EC-5, 5TM et GS-3 (suite)

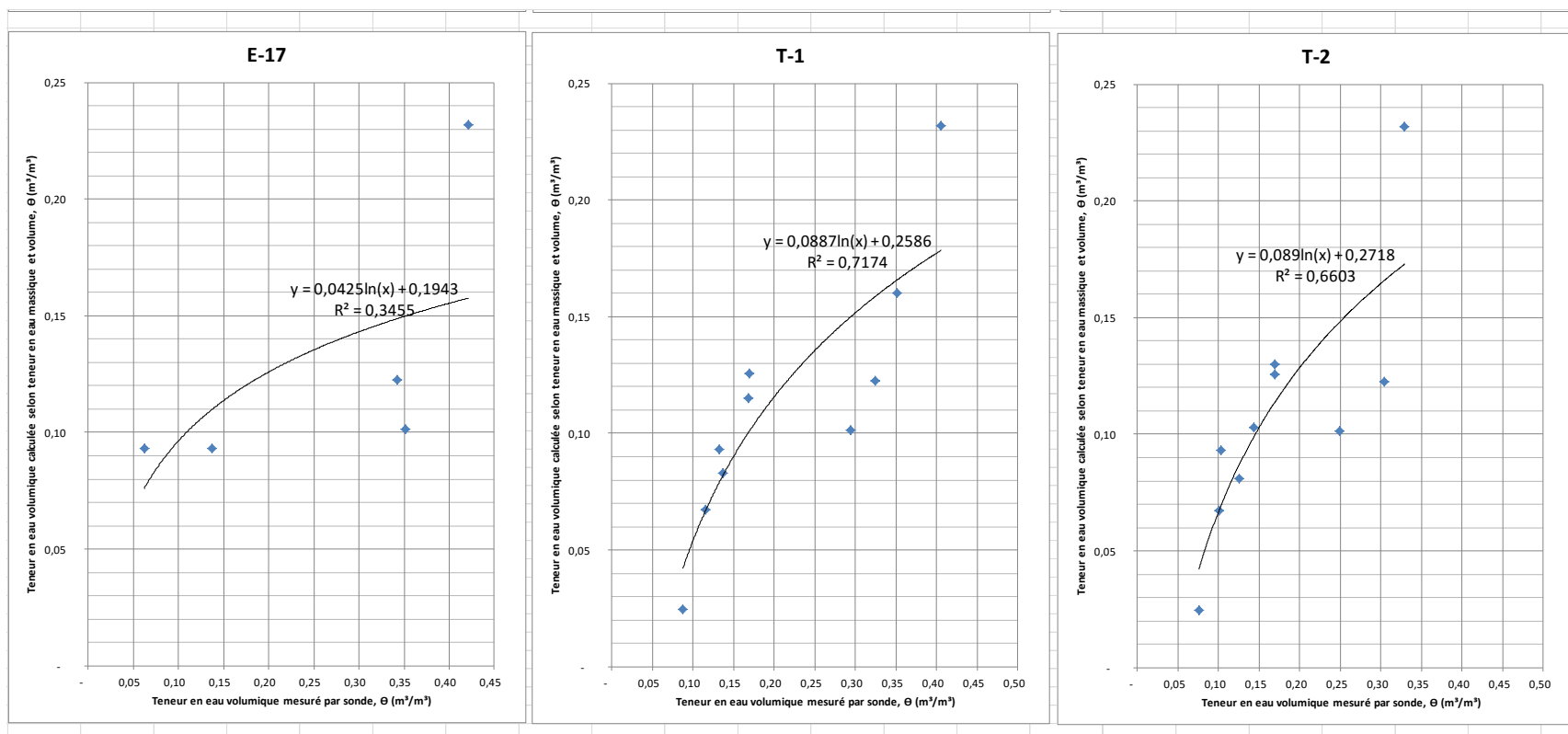
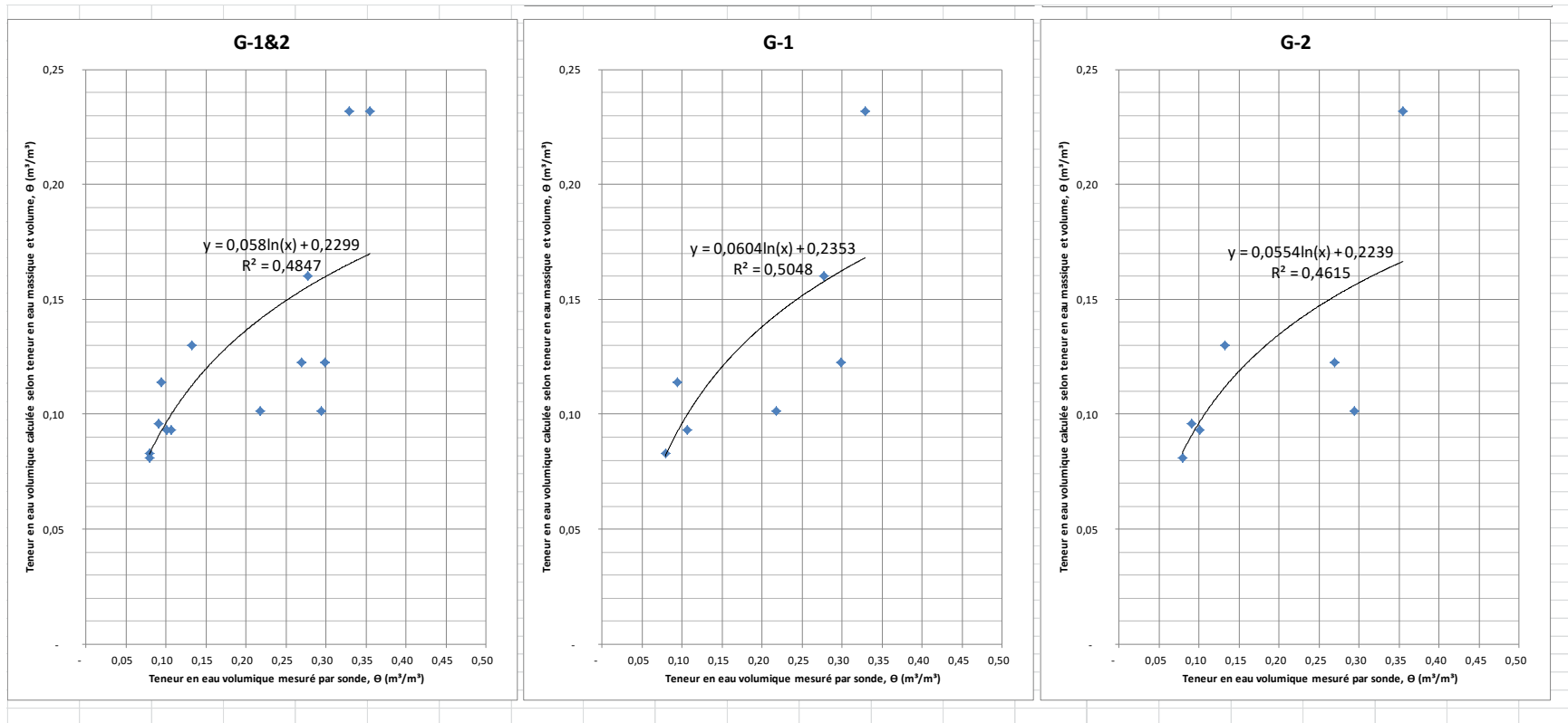


Tableau C.6 : Courbes de calibration des sondes Decagon EC-5, 5TM et GS-3 (suite)



Calibration des sondes à pression

Tableau C.7 : Exemple de calibration des sondes à pression

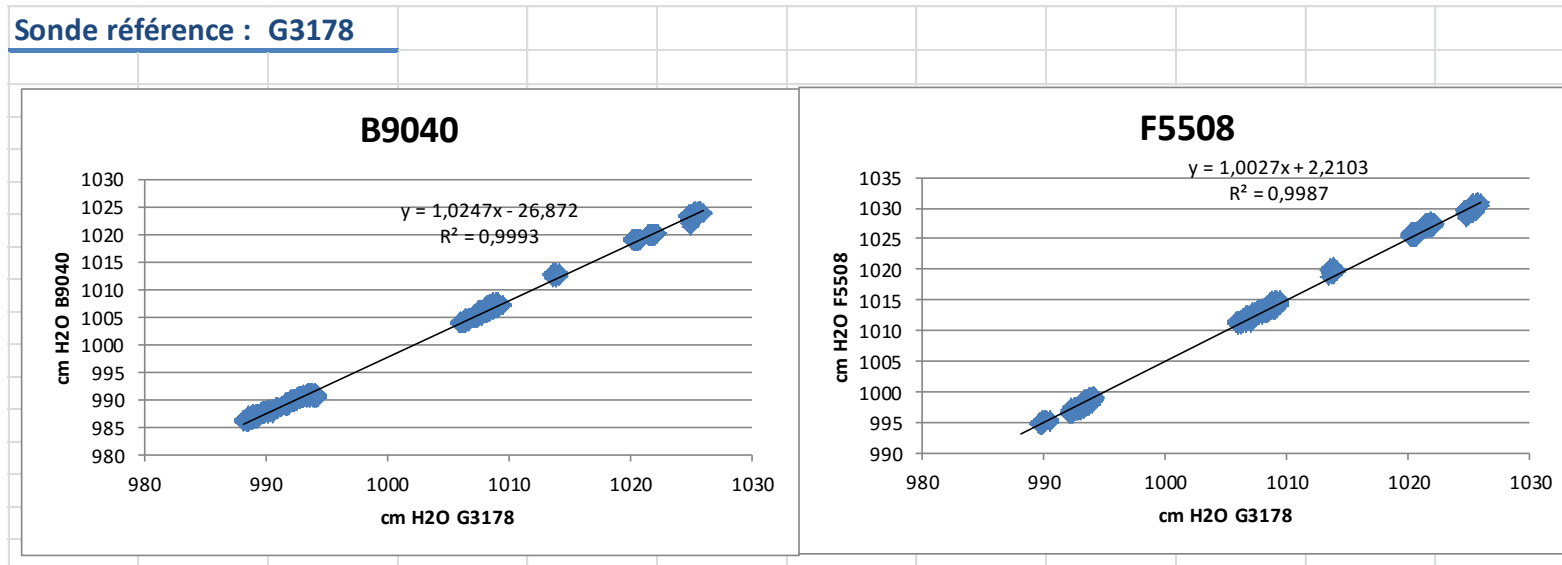


Tableau C.8 : Exemple de calibration des sondes à pression (suite)

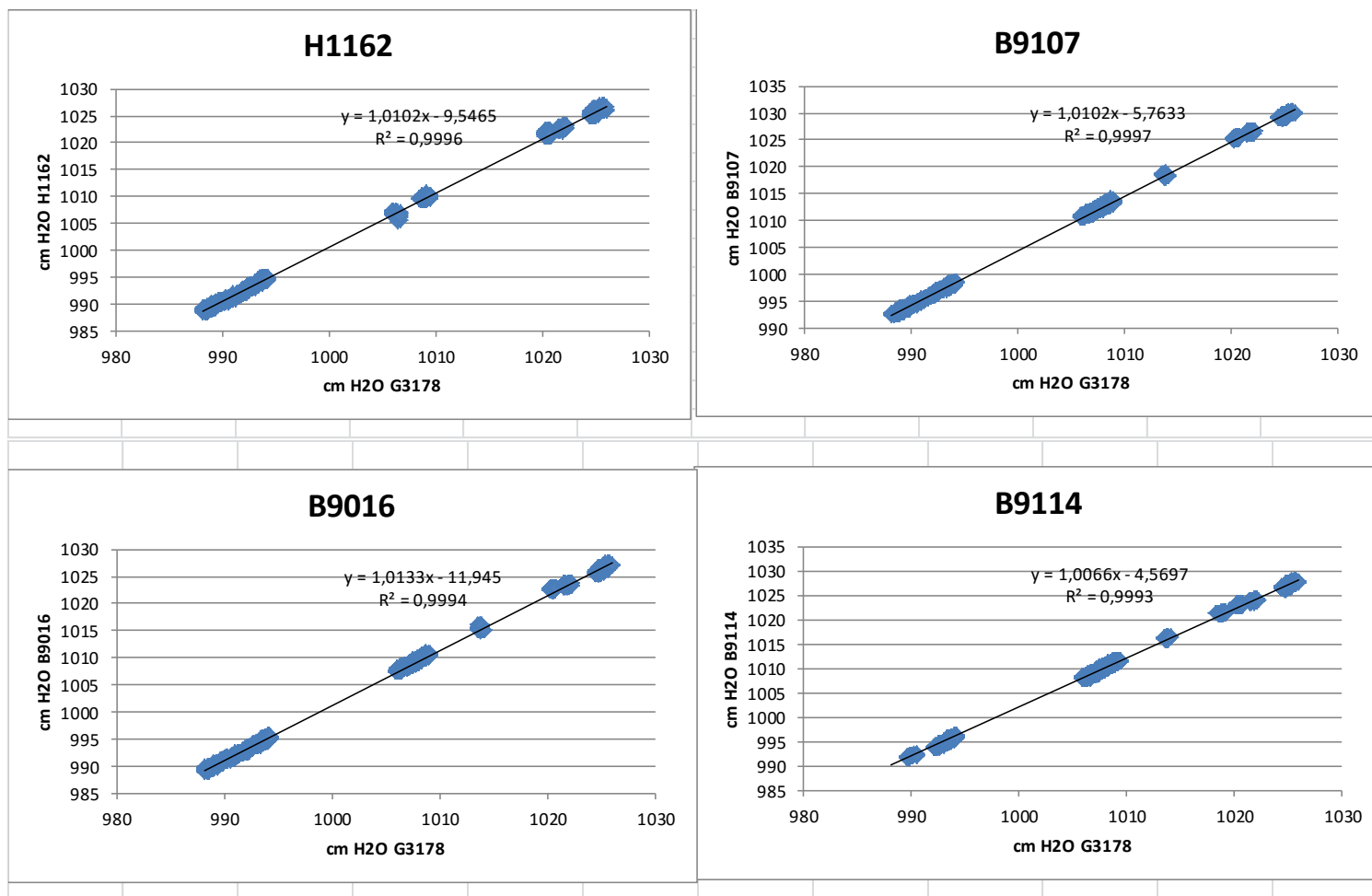
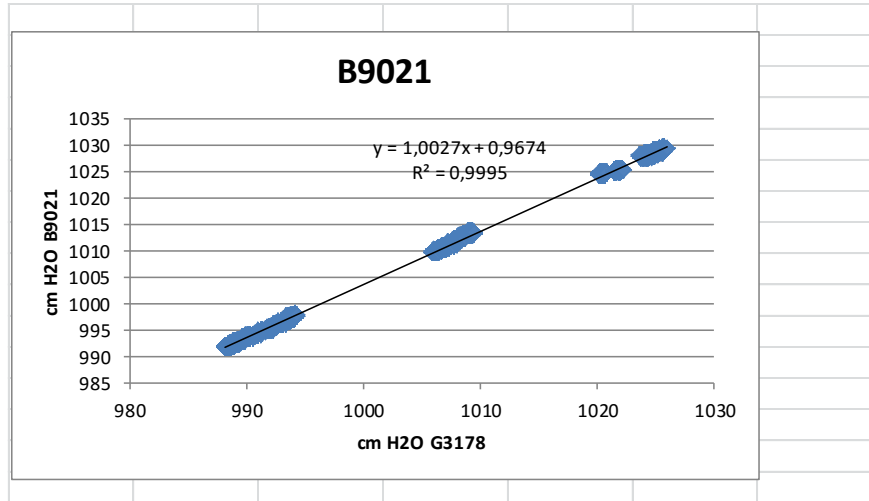


Tableau C.9 : Exemple de calibration des sondes à pression (suite)



Calibration tensiomètres

Tableau C.10 : Tableau de calibration des tensiomètres pour les essais en colonne.

pression kPa	Tensiomètre								
	T1	T2	T3	T5	T6	T7	T8	T9	T10
	4,82634	4,81635	4,79902	4,827674	4,79678	4,81995		4,830851	4,862705
16	4,7561	4,74799	4,73089	4,760846	4,731404	4,75029	1,05904	4,760045	4,791107
15	4,68705	4,67667	4,65999	4,6921	4,662048	4,68237	1,0548	4,688899	4,719774
12,5	4,61416	4,60576	4,5896	4,615656	4,58417	4,60421	1,0442	4,618452	4,648361
10	4,26733	4,25703	4,24352	4,267619	4,230436	4,25243	1,03224	4,258634	4,284368
5	4,03624	4,02833	4,01511	3,912246	3,872008	3,89552	1,015	3,900492	3,919169
1,5	3,65712	3,64536	3,64261	3,665601	3,622309	3,64686	1,00369	3,648388	3,663908
0	3,54448	3,54931	3,52105	3,55698	3,49156	3,49461	0,999515	3,51813	3,533739
-3,5	3,32944	3,3098	3,28333	3,30209	3,23766	3,26379	0,989138	3,26503	3,286436
-6	3,14945	3,13581	3,11333	3,14135	3,06097	3,09042	0,98237	3,06214	3,094764
-8,5	2,96723	2,93263	2,93436	2,95177	2,87956	2,90865	0,975844	2,90633	2,910607
-13,5	2,64137	2,59218	2,59556	2,63305	2,54374	2,53053	0,963019	2,55052	2,543342

ANNEXE D – PROTOCOLES DÉTAILLÉS DES ESSAIS

D.

Liste équipement essais en cuve

Liste de l'équipement utilisé pour faire les essais en cuve :

- Cuve cylindrique – diamètre 91 cm, profondeur 91,4 cm
- 2 colonnes en plexiglas – 30,4 cm de diamètre, 110 cm de hauteur
- 11 sondes diélectriques EC-5 (Decagon)
- 2 sondes diélectriques GS3 (Decagon)
- 2 sondes diélectriques 5TM (Decagon)
- 3 accumulateurs de données EM50 (Decagon) et connecteur USB
- 1 ordinateur ayant les programmes Ech2O et Pomiar installés
- 10 sondes à pression Mini-Diver modèle DI 601-10m (Schlumberger)
- 1 balance ayant une capacité d'au moins 120kg et étant connecté à l'ordinateur pour l'accumulation des données
- 2 pompes péristaltiques et au moins 5 m de tuyau flexible
- 1 trépied pour soutenir les équipements avec quelques pinces
- Eau distillée
- 1 infiltromètre à paroi simple d'environ 30 cm de diamètre
- 1 tapis de caoutchouc
- 2 palettes de bois
- 1 levier ayant une capacité de 2 tonnes avec les chaînes et crochets de levage
- 1 disque de compaction en acier de 45,5 cm de diamètre, ainsi qu'un crochet et une corde
- 1 système de direction de la compaction (12 points de compaction)
- 2 chronomètres (1 portatif)
- 1 baril en plastique léger de grande capacité
- 6 chaudières
- 1 petit sceau en acier
- 1 bol
- 2 sacs de plastiques
- Formulaire pour enregistrer les données des essais

Connexion avec l'accumulateur de données (ECH2O)

Entrer dans l'ordinateur (Utilisateur : étudiant, mot de passe : etud1ant) et démarrer le logiciel ECH₂O-Utility. Sélectionner 'Connect'. Le capteur de données utilisé est le Em50 (boîte blanche). Avant d'amorcer les essais, il faut s'assurer que les batteries fonctionnent (peser sur 'reset', la lumière 'status' devrait être verte), et que la connexion avec le câble entre le Em50 et l'ordinateur se fait bien (le statut des batteries peut être vérifié dans le logiciel). Sélectionner chaque sonde (sensor type) en fonction de la sonde connectée au port choisi. S'assurer de bien identifier le type de sonde attachée à chacun des ports pour chacun des capteurs de données utilisées (bien identifier chacune des boîtes Em50). Vérifier avec un bol d'eau que les lectures fonctionnent pour chacune des sondes avant de les placer dans la cuve. Chaque sonde devra être programmée aux minutes jusqu'à ce que l'essai soit terminé et ensuite programmé au choix.

Enregistrement avec l'accumulateur de données

Une fois que les sondes sont placées dans la cuve et que le capteur de données est activé, sélectionner 'download' et sauver les données dans un fichier. Bien identifier les fichiers.

Gestion des données et des enregistrements

Toutes les données obtenues doivent être documentées dans le cahier/fichier du projet sur une feuille Excel et créer un formulaire. Au minimum, inclure les informations suivantes :

- Fournisseur
- Numéro du modèle des sondes
- Numéro de série des sondes
- Numéro d'identification des sondes
- Précision des sondes
- Résolution de la sonde
- Étendue des mesures pouvant être enregistrées par les sondes
- La procédure utilisée pour la calibration
- Les dates de mélange des échantillons, de placement des matériaux dans la cuve, de compaction, des essais d'infiltration, des essais de densité en place et de teneur en eau
- Les lectures des sondes
- Nom de la/les personne(s) qui a(ont) fait les essais
- Les teneurs en eau visées lors de la préparation des échantillons

- Localisation de chacune des sondes
- Le nombre de coups avec le tampon de compaction, la hauteur de tombée et le poids du tampon
- Mesurer l'épaisseur de chaque couche après compaction.
- Masse des chaudières vides et avec matériau humide.
- Données pour l'échantillonnage de la teneur en eau massique
- Emplacements et hauteurs mesurés pour le matériau
- Sondes à pression utilisées et leurs emplacements
- Moment début infiltration, fin infiltration, début exfiltration et fin exfiltration

MÉTHODE DU SAND CÔNE

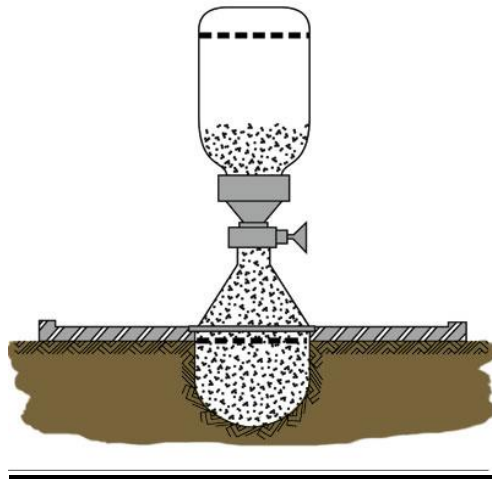


Figure D.1 : Schéma de l'essai au cône de sable.

En premier on doit savoir la densité du sable utilisé; la méthode qu'on utilisera est la méthode du pycnomètre pour trouver sa masse volumique comme décrit dans la procédure ASTM D854.

Ensuite, connaissant cela on va utiliser la méthode du Sand cône pour trouver la densité du sol compacté. Par couche compactée (3 en tout) on en fera trois analyses de densité, donc 9 en tout.

La méthode du sand cône (ASTM D1556 – 07) est résumée comme suit :

- Le sand cône est remplie du sable de masse volumique connue, et son poids mesuré (P1)
- Le sand cône est ensuite placé sur la base et la vanne ouverte le temps que le niveau du sable dans le cylindre se stabilise; le poids du sand cône est à nouveau prise (P2), la différence de poids représente le poids du sable déposé dans le cône et le bas du cône (P1-P2) ou Pcône. L'essai est répété deux autres fois et la valeur moyenne de Pcône trouvée
- La base est ensuite placée sur la couche du sol compacté dont la densité est à trouver; un trou est foré à la main d'une profondeur d'à peu près 6 cm; le sol récupéré (S) est mesuré et le sand cône ensuite placé sur la base et la vanne ouverte jusqu'à ce que le niveau du sable dans le cylindre soit stabilisé. La différence de poids représente le poids de sable déposé dans le cône, entre la base et le cône et le trou. Le poids de sable déposé dans le cône est déjà connu dans l'étape précédente. Le poids du sand cône est encore mesuré (Pfinal)
- Le poids déposé dans le trou (Pinitial-Pfinal-Pcône) ainsi que la masse volumique du sable, Mv, trouvée par la méthode de pycnomètre donne le volume du trou creusé.

Volume du trou en $\text{cm}^3 = (\text{Pinitial} - \text{Pfinal} - \text{Pcône}) / \text{Mv}$

- Deux autres mesures sont prises sur la même couche, donc 3 mesures par couche
- Les données sont entrées dans les tableaux EXCEL ci-joint pour toutes les 9 mesures de masse volumique pour les 3 couches.

Protocole des essais en colonnes

Une bonne caractérisation des propriétés hydrogéologiques des roches stériles, telles la courbe de rétention d'eau et la conductivité hydraulique, permet de mieux évaluer le comportement du matériau. Le matériau caractérisé lors des essais en colonne est le même que celui identifié au chapitre 3 et à la section 4.1. Selon les prédictions préliminaires de la courbe de rétention d'eau du matériau, l'échantillon qui permettra de déterminer la courbe complète devrait avoir des suctions de 1 à 1 000 kPa (voir section 3.2.3), ce qui correspond à la méthode E de la norme ASTM 6836-02.

Les méthodologies proposées par Chapuis et al. (2006), Hernandez (2007) et Peregoedova (2012) ont été utilisées comme référence afin de développer l'essai en colonne permettant d'obtenir les propriétés non saturées, c'est-à-dire la conductivité hydraulique et la courbe de rétention d'eau, pendant le drainage des roches stériles utilisées.

Méthodologie expérimentale

Les essais en colonne comprennent cinq (5) principales étapes : préparation de la colonne; montage de la colonne avec matériau à porosité constante puis saturation près 100% (selon méthode proposée par Chapuis et al., 2006); essai de perméabilité à charge constante; essai de drainage libre; démontage de la colonne et caractérisation de matériaux.

Il est important de réaliser d'abord une estimation de pour la CRE. Ceci permet de déterminer les dimensions requises pour la colonne en fonction de la succion nécessaire pour obtenir une courbe de rétention d'eau complète, et aussi pour déterminer les emplacements les plus favorables pour prendre des mesures avec les tensiomètres en utilisant les méthodes de prédiction décrites au chapitre 2 et 3. On cherche en particulier à évaluer la valeur d'entrée d'air (et de la teneur en eau résiduelle).

La norme ASTM D5856 (conductivité hydraulique saturée), indique par ailleurs que le diamètre maximal des particules du matériau testé doit être au plus un sixième (1/6) du diamètre ou de la hauteur de la colonne. La norme ASTM D2434 (perméabilité pour sols

granulaires) indique que le diamètre de la colonne doit être entre 8 ou 12 fois le diamètre des particules les plus grosses.

Les colonnes utilisées pour les essais ont un diamètre intérieur de 14,4 cm et une hauteur de 124 cm (par $d_{\max} = 1$ cm).

Il est recommandé d'utiliser deux colonnes afin de produire un duplicata et ainsi aider pour l'analyse des données. La balance utilisée pour peser les colonnes devrait avoir une précision d'au moins ± 2 g (e.g. Chapuis, et al., 2006).

Préparation d'une colonne

Les étapes pour le montage des colonnes peuvent être décrites sommairement comme suit :

Sélectionner une plaque en céramique et un anneau en métal d'un diamètre égal à celui de l'intérieur de la colonne et ayant une conductivité hydraulique saturée plus faible que celle prédite (ou calculée) pour le matériau. La plaque en céramique sera collée à l'intérieur de l'anneau en métal.

Sélectionner des embouts de céramique pour les tensiomètres d'un diamètre égale à celui de l'intérieur des connecteurs rapides à être utilisé avec les tensiomètres. La conductivité hydraulique des embouts doit être plus faible que celle prédite (ou calculée) pour le matériau. Les céramiques au bout des tensiomètres permettent d'avoir un lien hydraulique entre l'eau de la cellule et l'eau dans la chambre saturée entre la céramique et le tensiomètre. Puisque la céramique a un k_{sat} plus faible que le matériau, elle permet de continuer les mesures même en conditions désaturées.

Coller les céramiques (les embouts et la plaque) avec de la colle époxy en s'assurer de ne pas colmater l'ouverture. Laisser sécher au moins 24 heures et ensuite faire tremper les céramiques dans l'eau distillée afin d'initier la saturation de celles-ci avant que le montage complet soit terminé.

Sélectionner et préparer les bouchons, les adaptateurs, les valves à connexion rapide (quick-connect), les anneaux ronds en caoutchouc (o-rings), les joints d'étanchéités en caoutchouc (gaskets), les boulons, les écrous, les bouchons en plastique, le ruban Teflon blanc et rose, la

graisse en silicone pour vide, le géotextile, les plaques perforées, les ressorts, etc. De plus, inclure les pièces requises pour les sections suivantes :

- préparer une base en plastique ayant des rainures de drainage. Joindre à cette base une connexion rapide, un anneau rond en caoutchouc, et deux joints d'étanchéités.
- prendre un couvercle en plastique, transparent de préférence. Joindre une valve à connexion rapide sur le dessus de la colonne pour permettre de faire le vide et pour permettre la circulation d'eau.
- préparer un coude en 'Z' à être connecté au bas de la colonne pour que la nappe d'eau puisse être au-dessus de la plaque perforée et du tensiomètre au bas.
- planifier des ancrages pour être en mesure de déplacer avec un trépied (ou autre appareil de levage) la colonne une fois qu'elle sera remplie.
- percer un trou fileté au-dessus de la base de la colonne afin de permettre de faire des essais de perméabilité sans traverser la plaque poreuse au bas de la colonne.
- Percer des trous filetés où les embouts de connexion rapide doivent être placés. S'assurer que le filetage choisi est le même que celui des bouchons.
- Nettoyer chaque pièce à être utilisé pour construire la colonne ainsi que le filetage afin qu'il n'y ait pas de particules granuleuses pouvant affecter l'étanchéité et laisser sécher.

Assemblage :

- Visser tous les bouchons en plastique dans les trous filetés en prenant soin de bien appliquer un ou deux tours de ruban Teflon dans le sens du vissage. Mettre des bouchons ayant un trou au centre pour accueillir les connexions rapides où c'est nécessaire. Il est préférable d'éviter le contact entre le filetage de la colonne en plexiglas et le métal des connexions rapides pour éviter de fissurer le plexiglas en vissant. S'assurer de ne pas serrer trop fort, car ceci aurait pour effet de fissurer la colonne et d'en prévenir l'étanchéité.

Assembler la base de la colonne :

- Ordre d'assemblage du bas vers le haut : Base en plastique blanc, anneau rond en caoutchouc, deux joints d'étanchéités, bague en métal avec céramique collée à l'époxy, anneau rond en caoutchouc, colonne, plaque perforée et géotextile.
- Joindre les pièces de la base de la colonne ensemble en prenant soin d'appliquer généreusement de la graisse à vide dans la rainure sous l'anneau rond en caoutchouc et par-dessus, et de chaque côté des joints des d'étanchéités.
- Placer l'anneau rond graissé et la bague en métal qui soutient la plaque de céramique à la base de la colonne.
- Déposer la colonne sur la base et immobilisée en vissant les boulons et écrous.
- Prendre soin de visser les boulons et écrous en formant un schéma en étoile afin que le serrage soit appliqué uniformément. Il est préférable de serrer en trois étapes : la première étape avec les mains, la deuxième avec les clefs anglaises sans trop serrer et la troisième avec les clefs anglaises et en serrant plus fort.
- Déposer la plaque perforée et le géotextile au fond de la colonne.
- Assembler les sections de colonne en assurant l'étanchéité avec des anneaux ronds en caoutchouc, des joints d'étanchéités en caoutchouc et de la graisse à vide.

Assembler le dessus de la colonne :

- Mesurer la hauteur et le diamètre de l'intérieur de la colonne.
- Placer l'anneau rond et les deux joints d'étanchéités en caoutchouc en prenant soin de bien graisser toutes les parties avec de la graisse de silicone à vide.
- Déposer le couvercle et serrer avec les boulons et écrous en utilisant le schéma en étoile en trois étapes comme décrit au préalable pour la base de la colonne.
- Installer une connexion rapide sur le dessus de la colonne.
- Installer toutes les connexions rapides et autres bouchons nécessaires à l'étanchéité de la colonne en prenant soin de bien appliquer un ou deux tours de ruban Teflon dans le sens du vissage.

- Faire le vide dans la colonne et évaluer au son de l'air s'il y a des fuites. S'il y a des fuites, resserrer les bouchons ou les boulons selon le cas.
- Peser la colonne vide, M_1 (Chapuis et al. 2006).
- Garder l'état de vide dans la colonne et brancher une source d'eau distillée désaérée à la base. Laisser la colonne se remplir et vérifier s'il y a des fuites (bulles d'air). S'il y a des fuites, il faut soit resserrer les pièces concernées soit drainer la colonne d'eau et remplacer les pièces concernées. L'étanchéité à l'eau et à l'air (gaz) doit être atteinte afin d'avoir la possibilité d'obtenir un degré de saturation du matériau près de 100%.

Saturation :

- Lorsque la colonne est pleine d'eau, appliquer le vide au haut de la colonne et brancher l'eau désaérée sur chacun des connecteurs rapides ayant un embout en céramique. Cette étape assure que les chambres entre les connecteurs et les embouts sont remplis d'eau.
- Laisser les céramiques se saturer pendant au moins 24 heures. Faire le vide dans la colonne. Rebrancher une source d'eau distillée désaérée au bas de la colonne pour s'assurer que la colonne est complètement saturée.
- Peser la colonne pleine d'eau, M_e est la masse de la colonne et des pièces connexes remplies d'eau désaérée uniquement, pour connaître le volume total de la colonne (Chapuis et al. 2006).



Figure D.2 : Colonne remplie d'eau distillée désaérée

- Laisser la colonne pleine d'eau et sous vide jusqu'à ce que les préparatifs soient complétés pour débiter le montage de la colonne avec le sol, car les céramiques doivent demeurer saturées.
- Vider la colonne et assécher légèrement toutes les parties.

Montage de chaque colonne avec matériau

Préparation du matériau :

- Calculer la quantité de matériau nécessaire pour remplir la colonne selon les résultats des essais Proctor.
- Verser le matériau sur une bâche et humidifier, approximativement jusqu'à la teneur en eau optimale selon l'essai Proctor, en homogénéisant le matériau selon la norme ASTM C702.

- Mettre le matériau dans un contenant hermétique pour 24 heures afin que l'humidité soit bien homogénéisée à travers le matériau et assurer l'absorption de l'eau par les particules fines.
- Verser le matériau sur une bâche en homogénéisant le matériau selon la norme ASTM C702. Séparer le matériau en quatre parties équivalentes.

Placement du matériau dans la colonne :

- Peser la masse du matériau à être placé dans la colonne pour chacune des couches de matériau.
- Placer le matériau dans la colonne en couches d'environ 5 cm chacune. Utiliser une cuillère pour déposer le matériau dans la colonne avant de faire la compaction. Ceci évitera la ségrégation des particules.
- Compacter la couche de matériau avec le marteau Proctor selon ce qui a été déterminé pour les caractéristiques recherchées de l'essai. Le nombre de coups de marteau doit être constant pour chacune des couches de matériau. Le schéma de compaction doit être semblable à celui décrit dans la norme ASTM D698-12.
- Mesurer la hauteur du matériau dans la colonne suite à la compaction à 5 endroits (schéma en croix et une mesure au centre, voir figure 40).

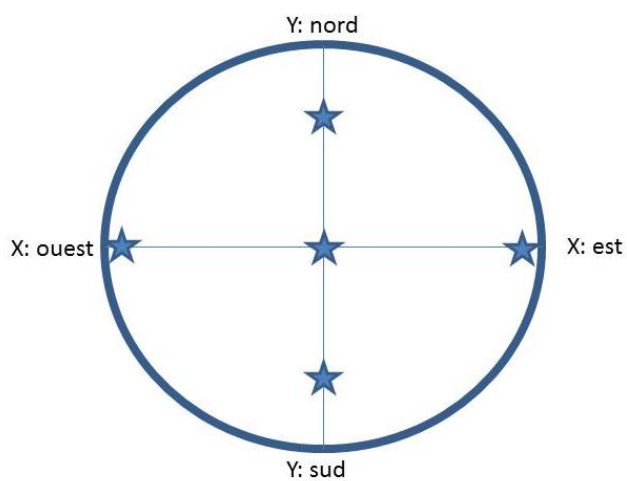


Figure D.3 : Schéma en croix de cinq (5) points pour mesurer la hauteur du matériau dans la colonne à chacune des couches

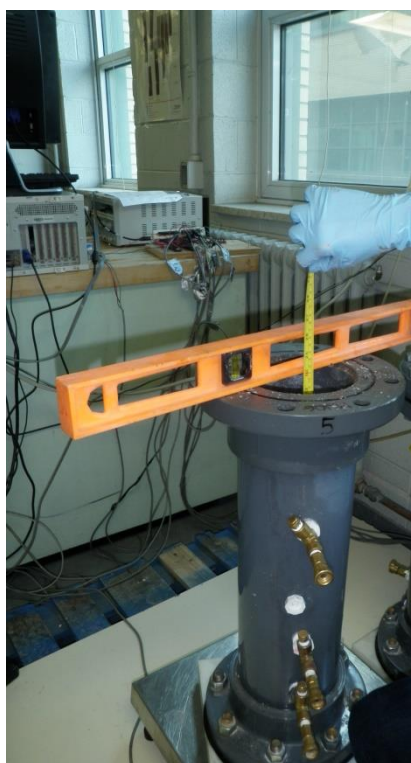


Figure D.4 : Exemple de prise de données des hauteurs du matériau sur 5 points en schéma en croix.

- Échantillonner du matériau humide à toutes les deux ou trois couches de matériau placées dans la colonne pour effectuer des essais de teneur en eau massique selon la procédure ASTM D 2216-10.
- Continuer de placer le matériau dans la colonne jusqu'à environ 2 cm de la surface. Faire l'assemblage de la colonne tel que décrit à la section précédente, mais ajouter sur la surface du matériau les pièces suivantes, en ordre croissant, un géotextile, une plaque perforée, 3 ou 4 ressorts et le couvercle. Cet assemblage permettra de garder le matériau en place pendant les essais.



Figure D.5 : Placement des ressorts entre la plaque perforée et le couvercle afin de garder le matériau en place

Le géotextile empêchera les particules fines de se déplacer pendant la saturation de la cellule. La plaque perforée et les ressorts empêcheront le matériau de se déplacer lors de la saturation du matériau. Malgré cette précaution, il est possible que certaines particules fines montent à surface, ce qui peut suggérer un débit de saturation trop élevée.

S'assurer de peser les pièces avant de les introduire dans la colonne puisqu'elles n'ont pas été pesées avec la colonne au préalable.

Peser la colonne en entier remplie de matériau sec sans les tensiomètres. M_h est la masse de la colonne et des pièces connexes remplie de matériau humide (Chapuis et al. 2006).



Figure D.6 : Prise de la masse de la colonne contenant du matériau et qui est saturée à l'eau distillée et désaérée.

Brancher les tensiomètres et s'assurer que les lectures sont semblables et constantes.

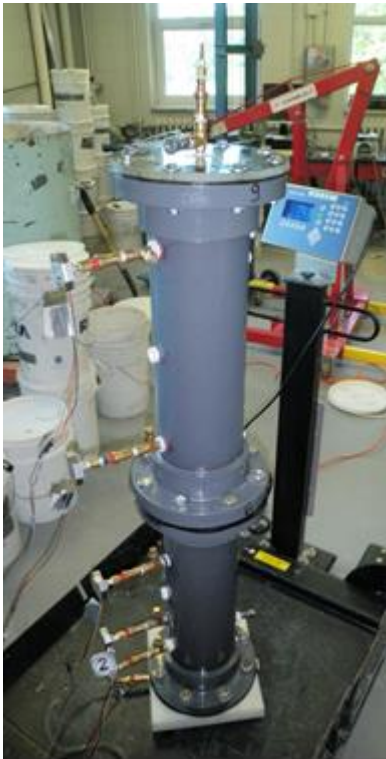


Figure D.7 : Prise de la masse de la colonne remplie de matériau et d'eau avec les raccords des tensiomètres.

Saturation du matériau :

- Appliquer le vide dans la colonne.
- S'assurer qu'il n'y a pas de fuite d'air. S'il y a une fuite, resserrer la pièce.
- Brancher une cellule d'eau distillée désaérée au bas de la colonne sous la plaque de céramique. La cellule doit être surélevée par rapport à la surface du sol dans la colonne afin de créer un gradient hydraulique. Ne pas dépasser le gradient hydraulique recommandé dans la norme ASTM D 5856-95 (section 8.2.1 de la norme) pour les essais de perméabilité, car ceci aurait pour effet de déplacer les particules fines. Pour le matériau utilisé pour cet essai, un gradient hydraulique maximal de 2 est recommandé en fonction des prédictions de conductivité hydraulique faites (voir section 3.2.3).

- Lorsque l'eau est visible en surface du matériau, ceci peut prendre plusieurs heures, brancher un tube d'eau pour permettre la circulation d'eau distillée désaérée du bas vers le haut de la colonne.
- Peser la colonne une à deux fois par jour et calculer le degré de saturation estimé atteint, S_r (Chapuis et al. 2006).

Analyser la tendance des valeurs obtenues par les tensiomètres pour évaluer si le degré de saturation est près de 100%, c'est-à-dire lorsque les valeurs seront près de la porosité calculée suite au montage.

Un exemple de données prises sur le montage de la colonne est présenté aux tableaux 1 et 2.

Tableau D.1 : Exemple de mesures des masses faites au montage de la colonne avant les essais.

Item mesuré	Abréviation	Mesure	Unité
Masse colonne pleine d'eau désaérée sans accessoires (g)	M_{e+col}	50,2	kg
Masse colonne sèche sans accessoires (g)	M_1	29,8	kg
Masse colonne remplie du matériau humide (g)	M_2	74,8	kg
Masse géotextile, plaque perforée - FOND	Macc-fond	86,4	g
Masse géotextile, plaque perforée et ressort - SURFACE	Macc-surface	212,4	g
Masse géotextile, plaque perforée et ressort	Maccessoire	298,8	g
Masse colonne remplie du matériau humide (g) + tensiomètres	M_2	77,0	kg
Masse eau colonne pleine	M_e	20,4	kg
Masse sol humide	M_h	44,7	kg
Masse solides	M_s	42,0	kg
Masse eau au moment du montage	M_w	2,7	kg

Tableau D.2 : Exemple des mesures de hauteur du matériau et poids prises pendant le montage de la colonne.

Couche	Profondeurs mesurées (cm)					Poids sol ajouté (g)	Moyenne profondeurs (cm)
	1	2	3	4	5		
Section du bas							
1	55,5	55,6	55,5	55,9	55,8	2018,1	55,7
2	49,8	50,3	49,5	49,8	50	2099,2	49,9
3	44,6	44,6	44,4	44,8	44,8	2034,4	44,6

Calculs au montage

Les calculs utilisés pour faire l'interprétation des conditions initiales du matériau suite au montage sont basés sur les formules décrites en détail dans l'article de Chapuis, Masse et al (2006) et sont présentés ici-bas. Les calculs peuvent être faits pour le spécimen complet ou pour chacune des couches de sol afin de vérifier l'homogénéité de placement de celui-ci.

- Masse colonne d'eau, M_e , (kg) :
- M_e est la masse de la colonne et des pièces connexes remplie d'eau désaérée uniquement
- Masse solides, M_s , (kg) :
- M_s est la masse de solides (sol seulement) $M_s = M_2 - M_1$
- Masse colonne vide, M_1 (kg) :
- M_1 est la masse de la colonne vide sèche et des pièces connexes
- Masse colonne avec sol sec, M_2 (kg) :
- M_2 est la masse de la colonne et des pièces connexes remplie de matériau sec

- Masse totale, M_{tot} (kg) :
- M_{tot} est la masse totale de la colonne avant les essais
- Masse humide du sol, M_h (kg) :
- M_h est la masse de la colonne et des pièces connexes remplie de matériau humide $M_h = M_{\text{tot}} - (M_e - V\rho_w)$
- ρ_w est la masse volumique de l'eau
- Masse d'eau, M_w , (kg) :
- M_w est la masse d'eau $M_w = M_h - M_s$
- Volume total du spécimen, V (cm³) :
- V est le volume total du spécimen testé $V = A_c L$
- A_c est l'aire interne de la colonne $A_c = \pi(D/2)^2$
- L est la longueur du spécimen
- Volume des vides, V_v (cm³) :
- V_v est le volume des vides $V_v = V - M_s/\rho_s = V_a + V_w$
- ρ_s est la masse volumique des solides du spécimen testé
- V_a est le volume de l'air
- V_w est le volume de l'eau
- Degré de saturation, S_r (%) :
- S_r est le degré de saturation $S_r = V_w/V_v = M_w/(\rho_w V_v) = (M_{\text{tot}} - M_e + V\rho_w - M_s)/(\rho_w[V - (M_s/\rho_s)])$
- Teneur en eau volumique, Θ (cm³/cm³) :
- Θ est la teneur en eau volumique $\Theta = V_w/V = nS_r$
- n est la porosité totale $n = V_v/V = (V_a + V_w)/V$
- Poids unitaire sec, Υ_d (kN/m³) :

- γ_d est le poids unitaire sec $\gamma_d = (e S_r \gamma_w) / ([1+e]w) = G_s \gamma_w (1-n)$

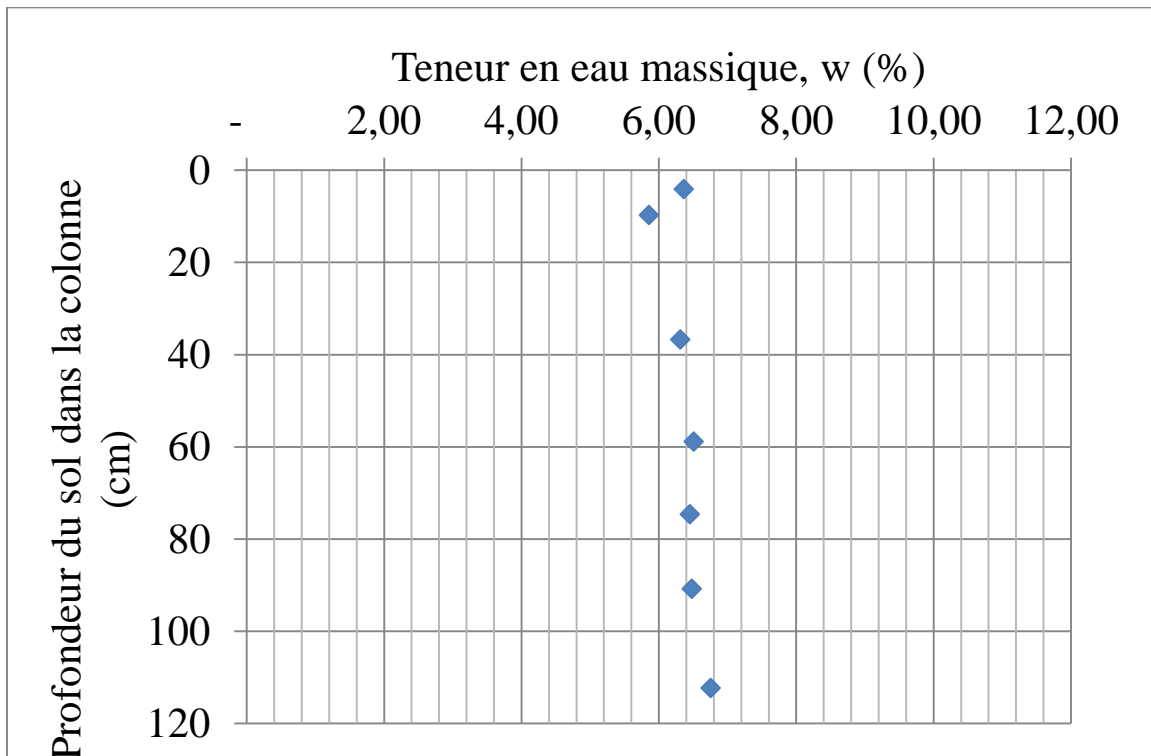


Figure D.8 : Exemple de graphique des teneurs en eau massique en fonction de la profondeur du matériau dans la colonne suite au montage de la colonne

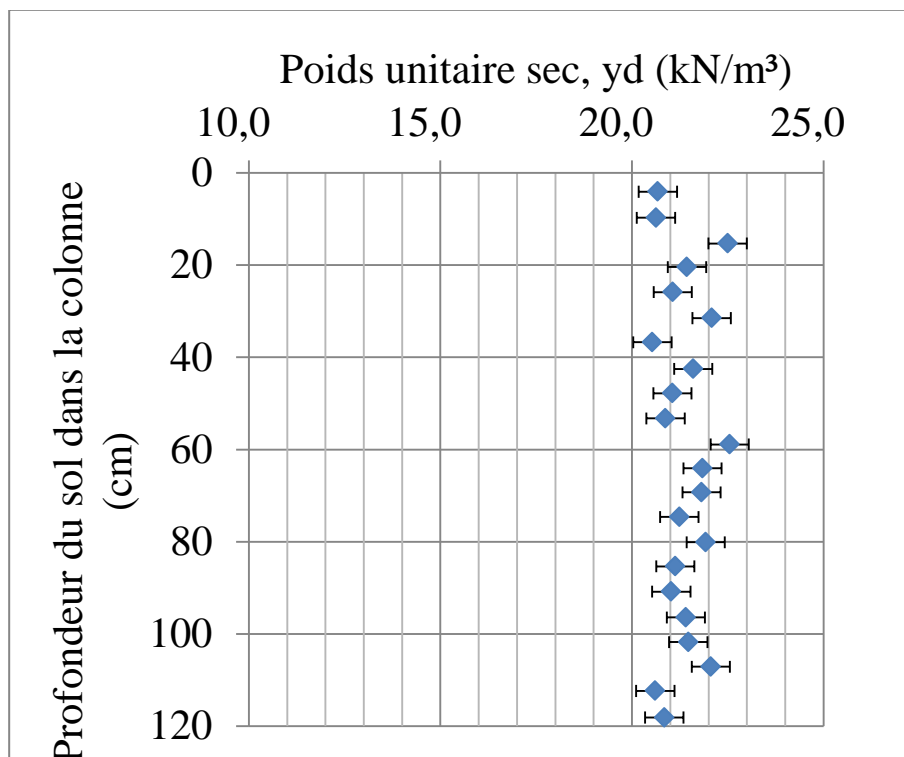


Figure D.9 : Exemple de graphique du poids unitaire sec en fonction de la profondeur du matériau dans la colonne suite au montage de la colonne

Essai de perméabilité en colonne

L'essai de perméabilité permet de déterminer la conductivité hydraulique selon le degré de saturation du matériau. Il est recommandé par Chapuis et al. (2006) de faire un essai à différence de charge constante. Le schéma présenté figure 47 présente le matériel requis pour l'essai et les conditions réelles de l'essai.

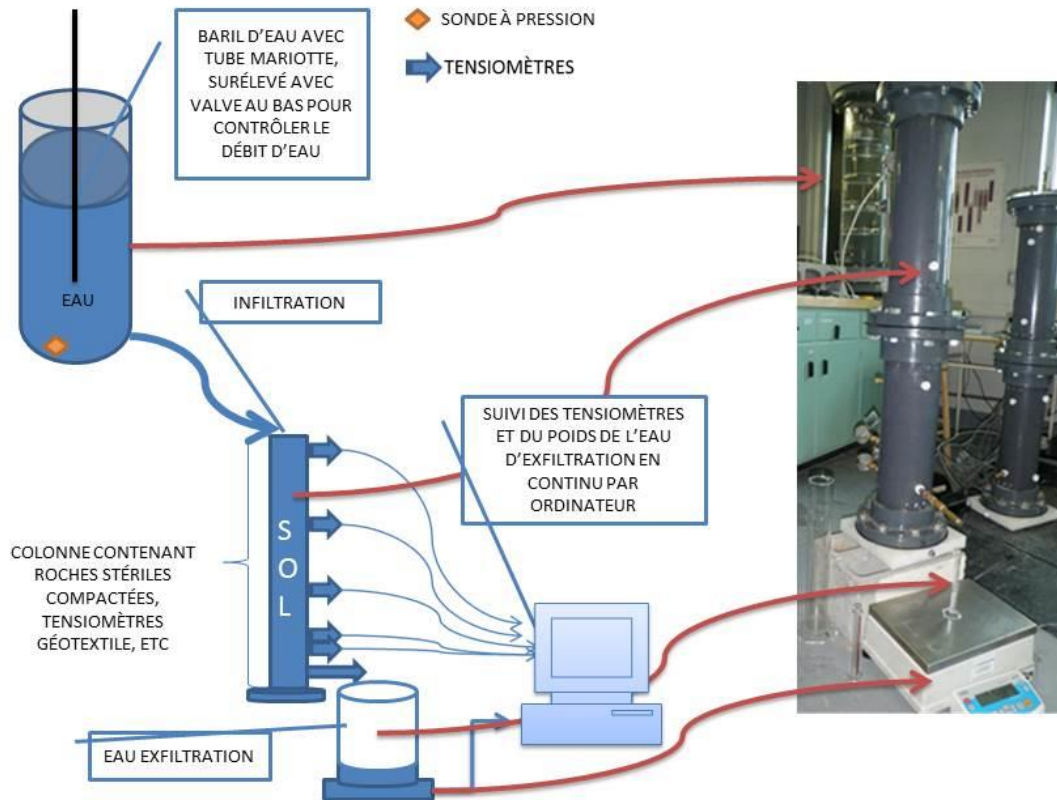


Figure D.10 : Schéma des installations pour l'essai de perméabilité à charge constante sur le matériau placé dans une colonne de 1,2 m de hauteur avec une cellule Mariotte contenant de l'eau distillée.

Un exemple type des données enregistrées pendant l'essai de perméabilité en colonne est présenté au tableau suivant. Il est à noter que les mesures de poids sont plus précises que les mesures lues sur l'éprouvette. Les mesures lues sur l'éprouvette permettent de valider les mesures prises sur la balance. La section 2.1.3 décrit en détail les calculs associés aux essais de perméabilité.

Tableau D.3 : Exemple de données enregistrées pendant l'essai de perméabilité en colonne.

Temps écoulé (hh:mm:ss)	Poids balance éprouvette (g)	Mesure lue sur éprouvette (ml)	# éprouvette
00:00:00	36,1	0	4
00:01:00	36,8	0	4
00:01:15	37	1	4
00:01:30	37,3	1,2	4
00:01:45	37,6	1,5	4
00:02:00	37,8	1,7	4
00:02:30	38,4	2,2	4
00:03:00	38,8	2,7	4
00:03:30	39,3	3,2	4
00:04:00	39,8	3,7	4
00:04:30	40,3	4,1	4
00:05:00	40,7	4,6	4

Essai en drainage libre en colonne

L'essai de drainage libre a été décrit par Chapuis et al. (2006 et 2007), Hernandez (2007), Intissar (2009) et Peregoedova (2012). Une description détaillée est fourni ici-bas en fonction des essais qui ont été faits :

- Saturer le matériau selon la procédure décrite à la section 0.

- Peser la colonne sans les tensiomètres et avec les tensiomètres et calculer le degré de saturation du matériau. Un degré de saturation d'au moins 85% est préférable (Chapuis 2007).
- Installer le coude en 'Z' au bas de la colonne afin que l'eau drainant de la colonne traverse la plaque en céramique tout en maintenant une nappe d'eau au-dessus du tensiomètre le plus bas en tout temps d'environ 10 cm de hauteur (Chapuis et al., 2006).

Essai de drainage :

- Activer l'enregistrement avec les tensiomètres.
- Enregistrer le temps, le poids de la colonne et le poids de l'eau d'exfiltration à partir du début de l'essai. Ceci permet de suivre la perte de poids de la colonne et le gain de poids en eau d'exfiltration en fonction du temps.
- Brancher simultanément le coude en 'Z' au bas de la colonne et une valve permettant à l'air d'entrer dans la colonne à partir du couvercle.
- Drainer la colonne en mesurant le débit d'écoulement avec des intervalles spécifiques de temps (au début aux secondes) en augmentant graduellement l'écart de temps entre les mesures selon l'évolution de l'écoulement.

Le drainage peut continuer pendant plusieurs jours dus à la rétention de l'eau par les forces capillaires. Le drainage est terminé lorsque la masse de la colonne et du contenant d'exfiltration n'ont pas changé pendant plusieurs jours. Il est supposé que le sol est en régime d'équilibre hydrostatique lorsque cette condition est atteinte (Chapuis et al., 2006). La charge et les valeurs de succions dans la colonne peuvent être vérifiées avec les tensiomètres afin de déterminer si le système est en équilibre. Les tensiomètres sont en équilibre lorsque la succion est égale à la hauteur ($\psi = z$) au-dessus de la nappe phréatique.

Les quantités d'eau récupérées à la fin de l'essai sont influencées par l'évaporation d'eau (Chapuis et al., 2006), donc des précautions doivent être prises pour diminuer l'impact de l'évaporation. Le contenant recevant l'eau d'exfiltration peut être recouvert d'un plastique flexible pour diminuer cet effet.

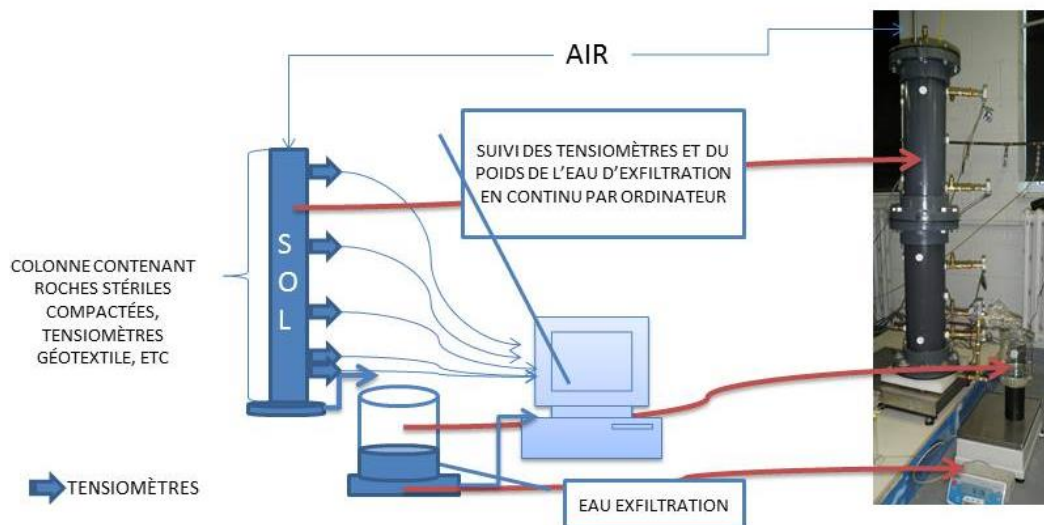


Figure D.11 : Installation de la colonne sur une balance à enregistrement par ordinateur et enregistrement du poids de l'eau d'exfiltration pendant le drainage libre sur une balance électronique relié à un ordinateur. Les tensiomètres sont raccordés au système d'enregistrement des données par ordinateur.

Démontage des colonnes et essais standards

- Enlever le couvercle, les boulons, les écrous, les ressorts et la plaque perforée et peser.
- Mesurer la hauteur du sol (5 points avec schéma en croix) au-dessus et en dessous du géotextile. Faire une teneur en eau massique sur le géotextile selon la procédure ASTM D2216-10.
- Enlever l'équivalent d'environ une couche de sol graduellement en prenant soin de mesurer les hauteurs du sol (5 points en croix) et de faire les teneurs en eau massique (ASTM D2216-10) pour la totalité du sol prélevée à chacune des couches extraites.
- Prélever des couches plus minces près de la nappe d'eau pour essayer de capturer la valeur d'entrée d'eau.

- Faire des essais de distribution granulométrique pour au moins trois couches (surface, centre et bas) afin de déterminer s'il y a eu un déplacement des particules fines lors des essais.

Calculs au démontage

Les mesures obtenues à la section précédente permettent d'obtenir la teneur en eau volumique en fonction de la succion, ce qui est appelé la courbe de rétention d'eau par plusieurs auteurs (Barbour, 1998; Fredlund, 2000; Fredlund, 2002). Les calculs au démontage sont semblables à ceux du montage de la colonne présenté à la section 0, mais effectué dans l'ordre inverse. Les mesures doivent être prises pour chaque couche de sol prélevé afin de collecter les données nécessaires pour déterminer la courbe de rétention d'eau du matériau. Le graphique présenté ci-dessous est un exemple de données obtenues lors du démontage d'une colonne en fonction de la teneur en eau massique et de la profondeur.

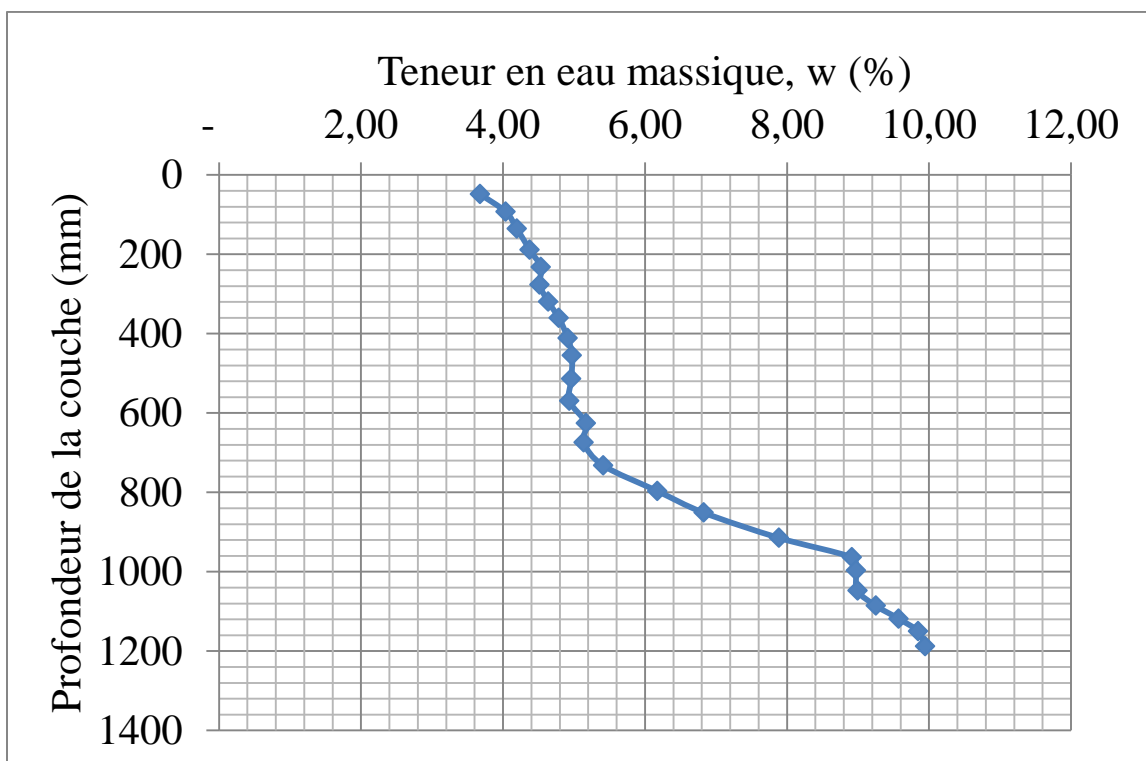


Figure D.12 : Exemple de graphique des teneurs en eau massique en fonction de la profondeur du matériau dans la colonne

Des essais de distribution granulométrique selon la norme ASTM D422 ont été effectués au démontage de chaque colonne à au moins trois endroits, soit le haut, le centre et le bas. Ceci permettra d'évaluer s'il y a eu un déplacement des particules pendant les essais de drainage.

Variante pour l'obtention de la teneur en eau résiduelle

Un essai pour tenter d'obtenir la teneur en eau résiduelle du matériau a été fait. L'essai est très semblable avec à celui fait pour obtenir la courbe de rétention d'eau à la section 4.1.3. Les différences principales sont dans la hauteur de la colonne et la succion appliquée au bas de la colonne à l'aide d'une mini-cellule créant une succion élevée dans la colonne afin d'accélérer le drainage libre et d'atteindre la teneur en eau résiduelle du matériau.

La procédure décrite ici-bas inclut seulement les points qui sont différents de la procédure pour l'obtention de la CRE.

Installer une mini-cellule reliée au bas de la colonne avec un tube ayant un petit diamètre. Le tube et la cellule doivent être complètement saturés et remplis avec de l'eau désaérée. S'assurer que le système au complet est saturé et qu'il y a un lien hydraulique entre la cellule et la colonne.

Essai de drainage :

- L'enregistrement de la masse de la colonne et de l'eau d'exfiltration est préférable, pour faire le suivi de l'évolution de l'essai. S'il n'est pas possible de faire l'enregistrement, seulement les valeurs obtenues au démontage pourront être utilisées.
- Abaisser la cellule sous la base de la colonne graduellement afin d'activer la succion dans la colonne. Abaisser quelques centimètres tous les jours. Utiliser les prédictions faites pour les paramètres de la CRE (voir section 3.2.3) afin de déterminer la limite d'abaissement de la cellule. La cellule devrait être abaissée pour que la hauteur de succion prédite pour la teneur en eau résiduelle soit au centre du spécimen dans la

colonne. Cette façon de faire permet de collecter les valeurs de teneur en eau massique près du point de prédiction et ainsi mieux estimer la teneur en eau résiduelle du matériau.

Le drainage peut continuer pendant plusieurs jours dus à la rétention de l'eau par les forces capillaire. Le drainage est terminé lorsque la masse de la colonne et du contenant d'exfiltration n'ont pas changé pendant plusieurs jours. Il est supposé que le sol est en régime d'équilibre hydrostatique lorsque cette condition est atteinte (Chapuis et al., 2006). La charge et les valeurs de succions dans la colonne peuvent être vérifiées avec les tensiomètres afin de déterminer si le système est en équilibre. Les tensiomètres sont en équilibre lorsque la succion est égale à la hauteur ($\psi = z$) au-dessus de la surface de l'eau de la cellule qui applique la succion.

Les quantités d'eau récupérées à la fin de l'essai sont influencées par l'évaporation d'eau (Chapuis et al., 2006), donc des précautions doivent être prises pour diminuer l'impact de l'évaporation. Le contenant recevant l'eau d'exfiltration peut être recouvert d'un plastique flexible pour diminuer cet effet.

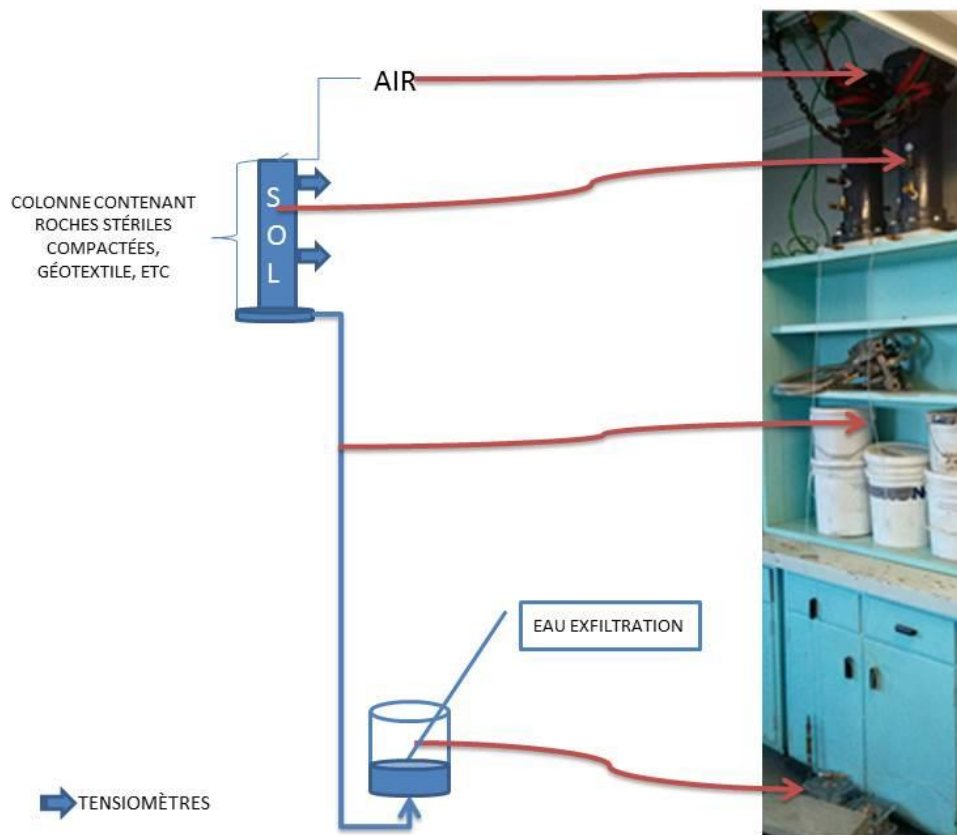


Figure D.13 : Schéma et photo de l'installation et des équipements requis pour faire les essais en colonne pour essayer de déterminer les teneurs en eau volumique résiduelle du matériau.

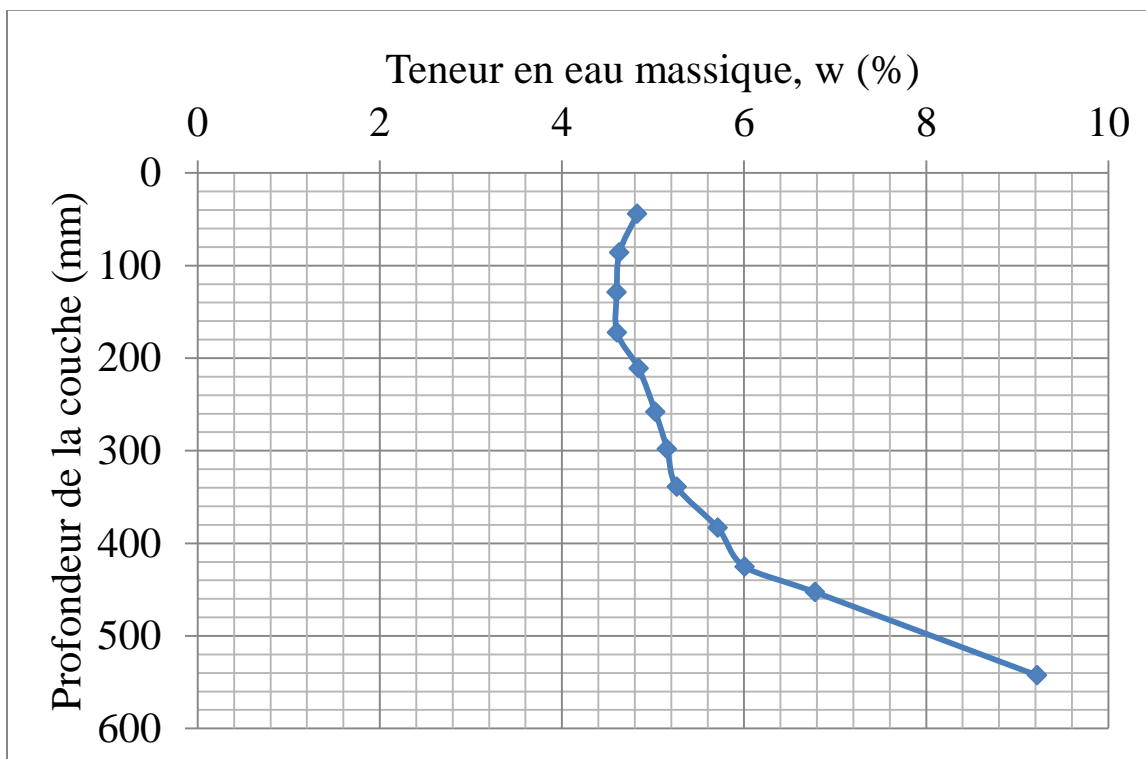


Figure D.14 : Exemple de graphique des teneurs en eau massique en fonction de la profondeur du matériau dans la petite colonne pour TEVR

ANNEXE E – RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE

E.

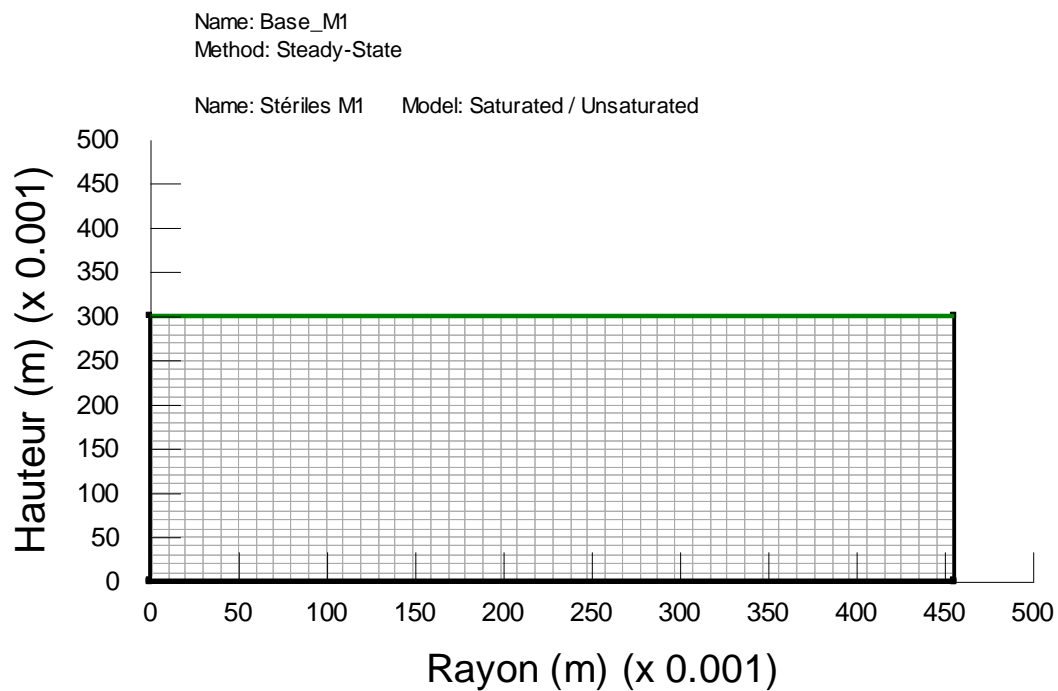


Figure E.1 : Modèle de base et maillage

Simulation M1E2

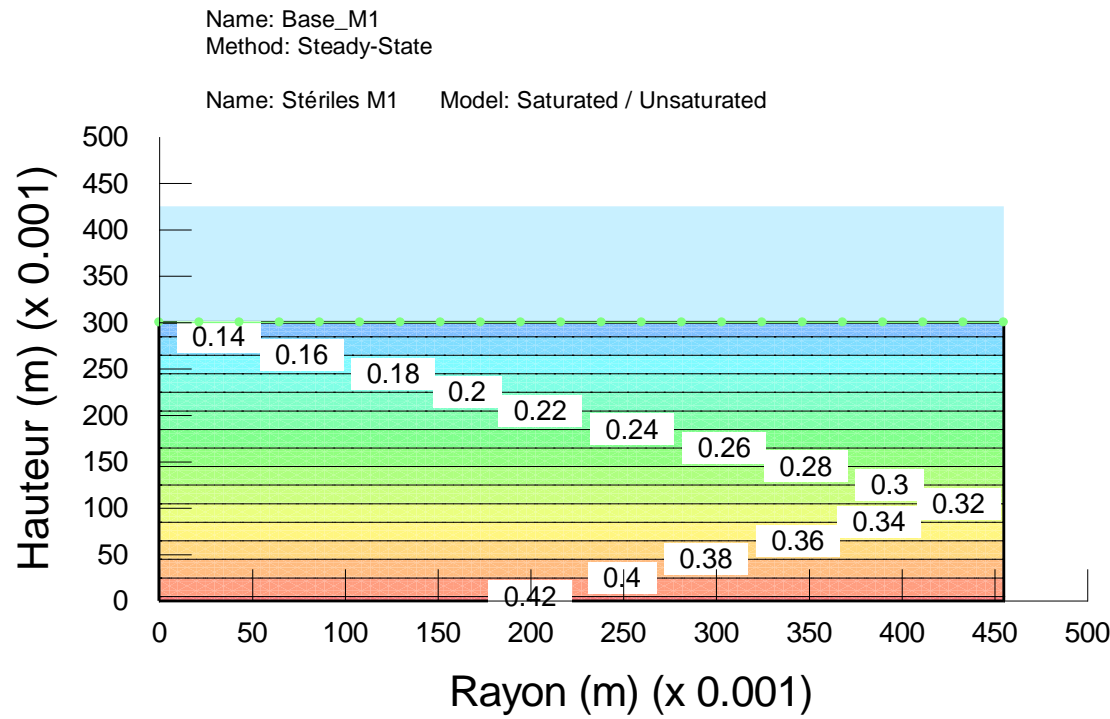


Figure E.2 : M1 est écoulement permanent, charge de pression (m H₂O).

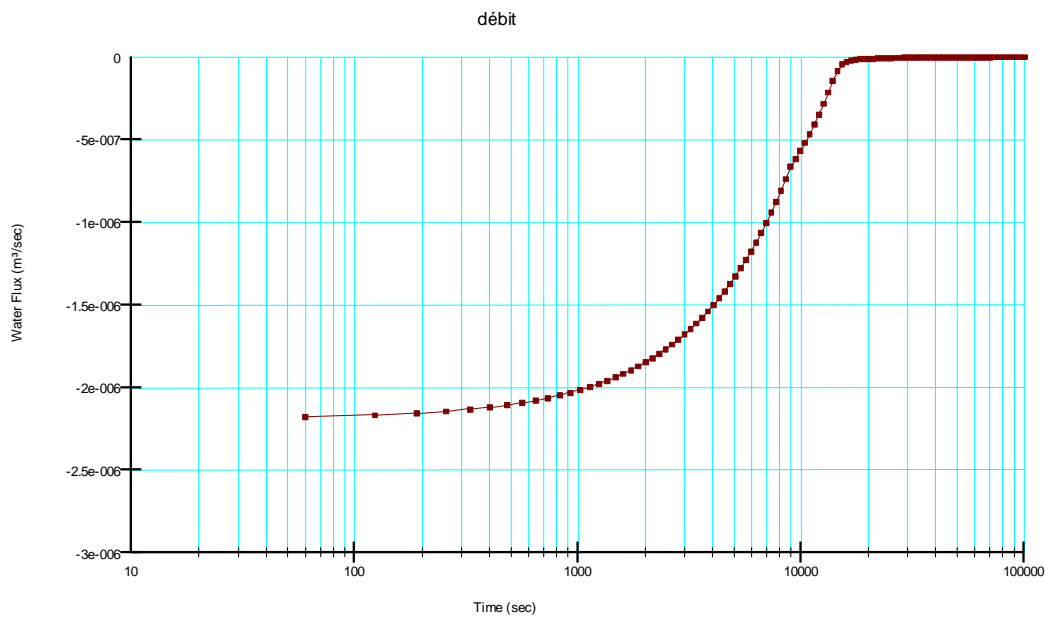


Figure E.3 : M1 débit en fonction du temps

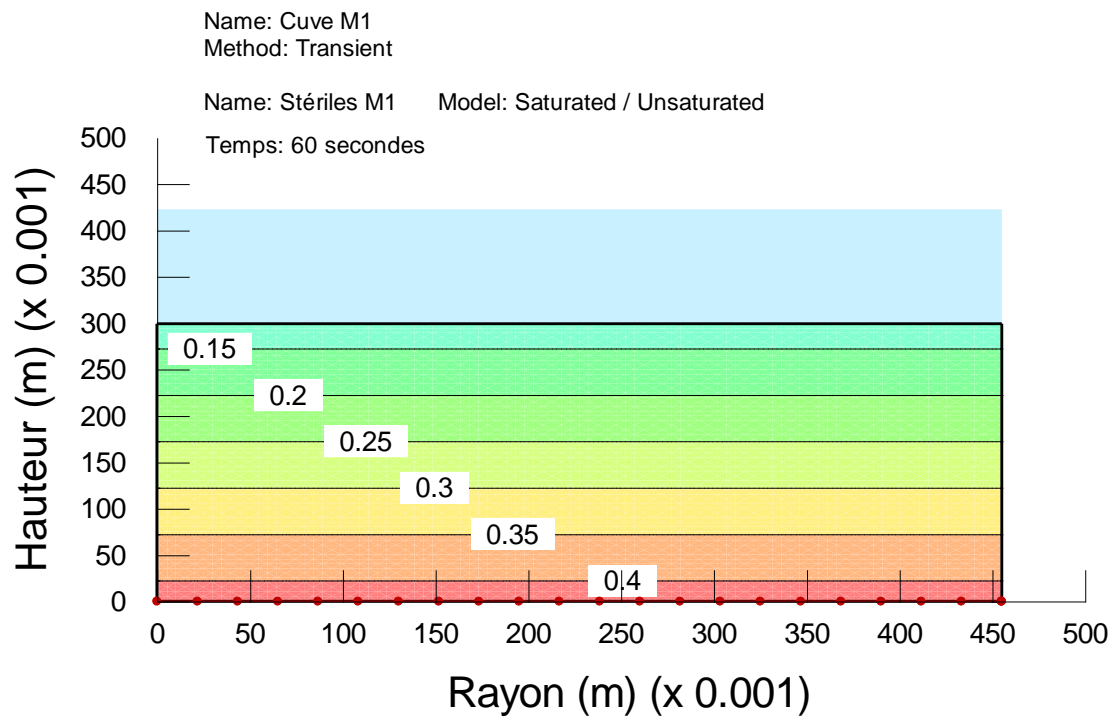


Figure E.4 : M1 est écoulement transitoire – à 60 secondes, charge de pression (m H₂O)

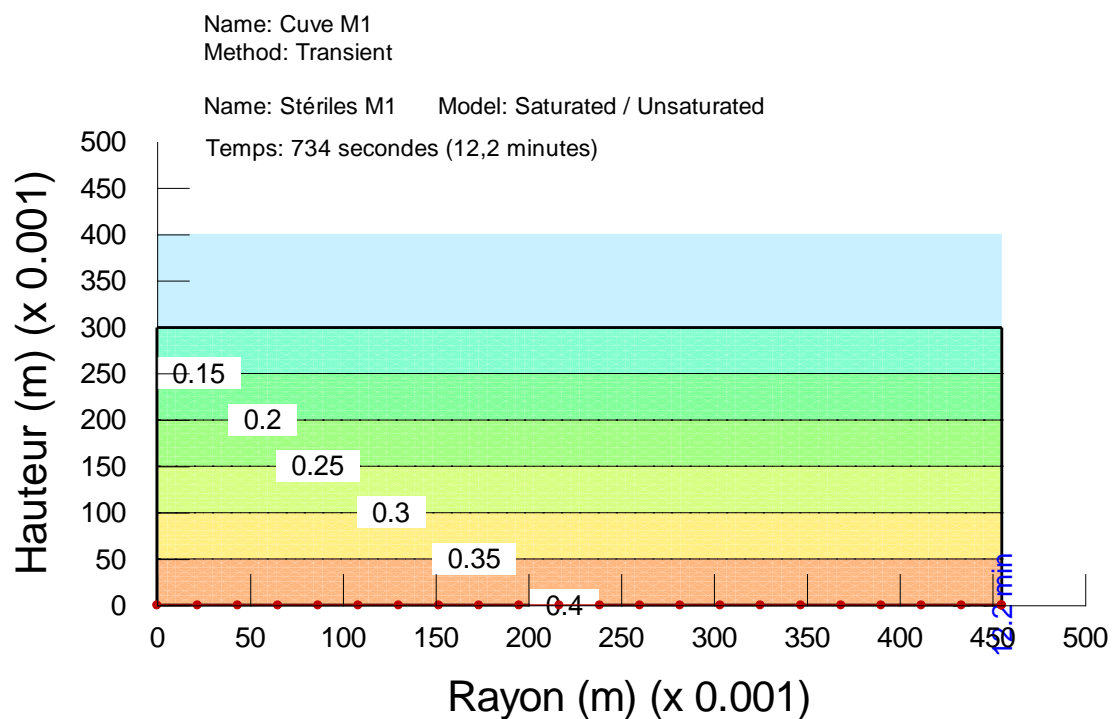


Figure E.5 : M1 est écoulement transitoire – à 734 secondes, charge de pression (m H₂O)

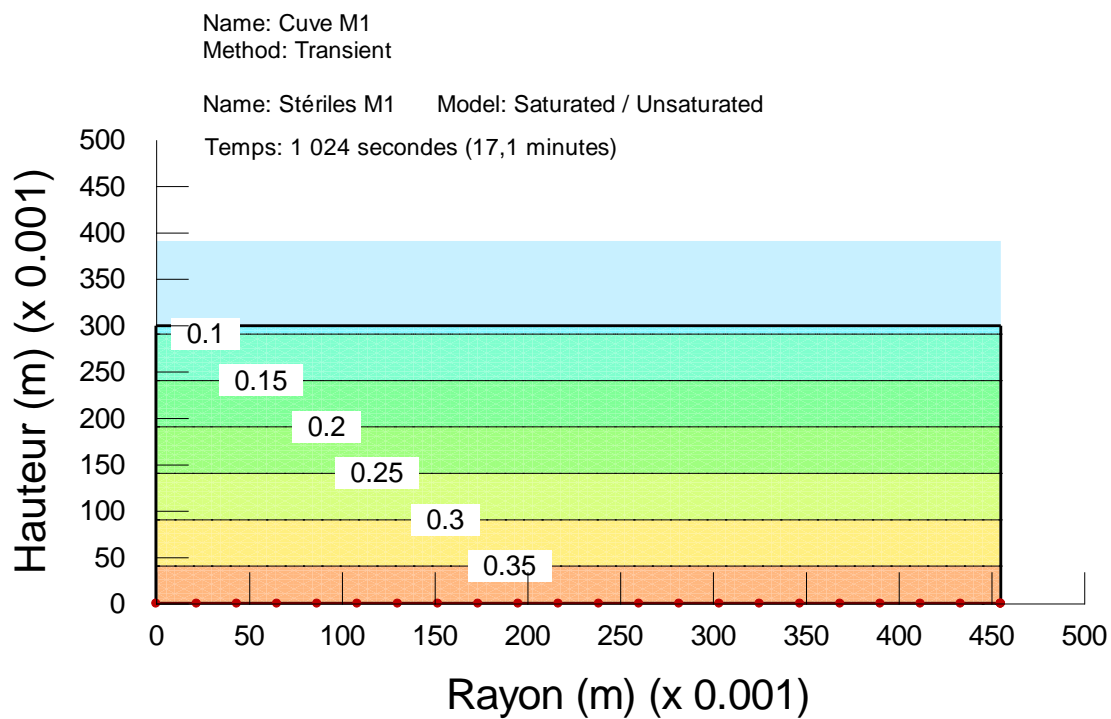


Figure E.6 : M1 en écoulement transitoire – à 1 024 secondes, charge de pression (m H₂O)

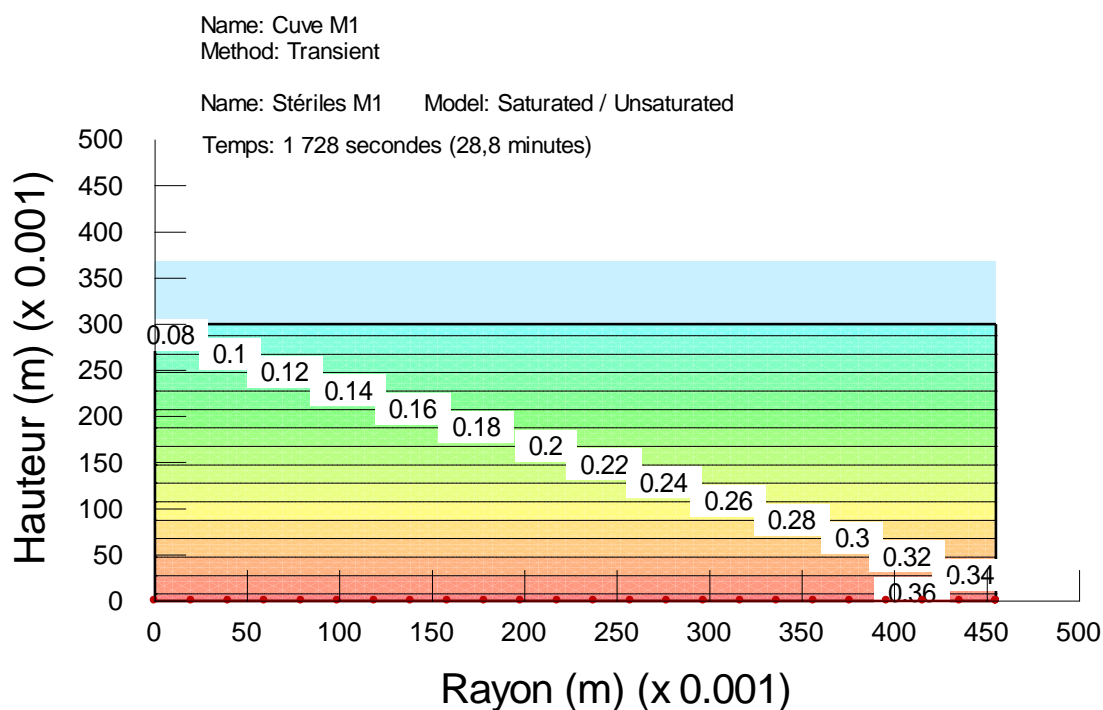


Figure E.7 : M1 en écoulement transitoire – à 1 728 secondes, charge de pression (m H₂O)

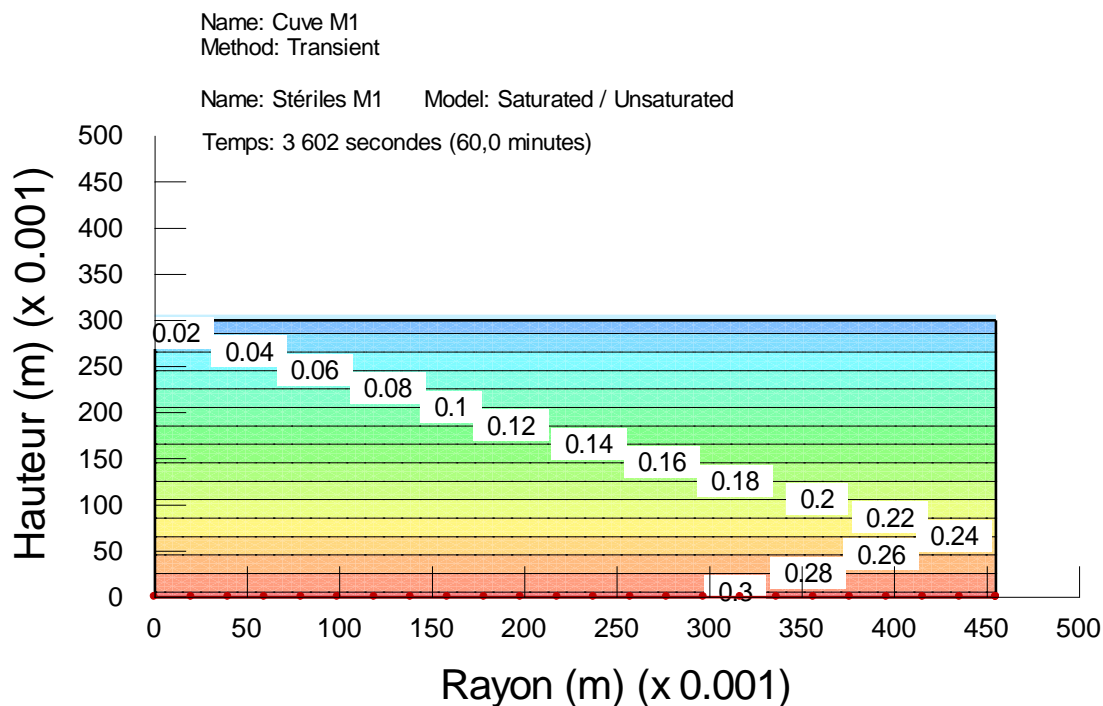


Figure E.8 : M1 en écoulement transitoire – à 3 602 secondes, charge de pression (m H₂O)

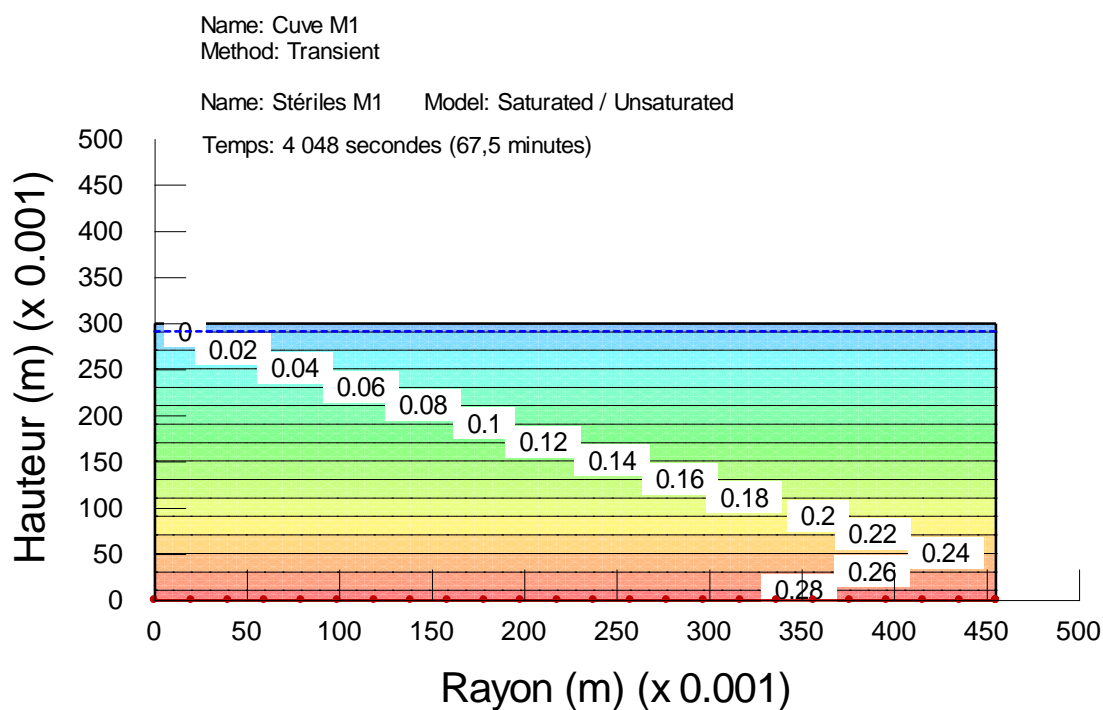


Figure E.9 : M1 en écoulement transitoire – à 4 048 secondes, charge de pression (m H₂O)

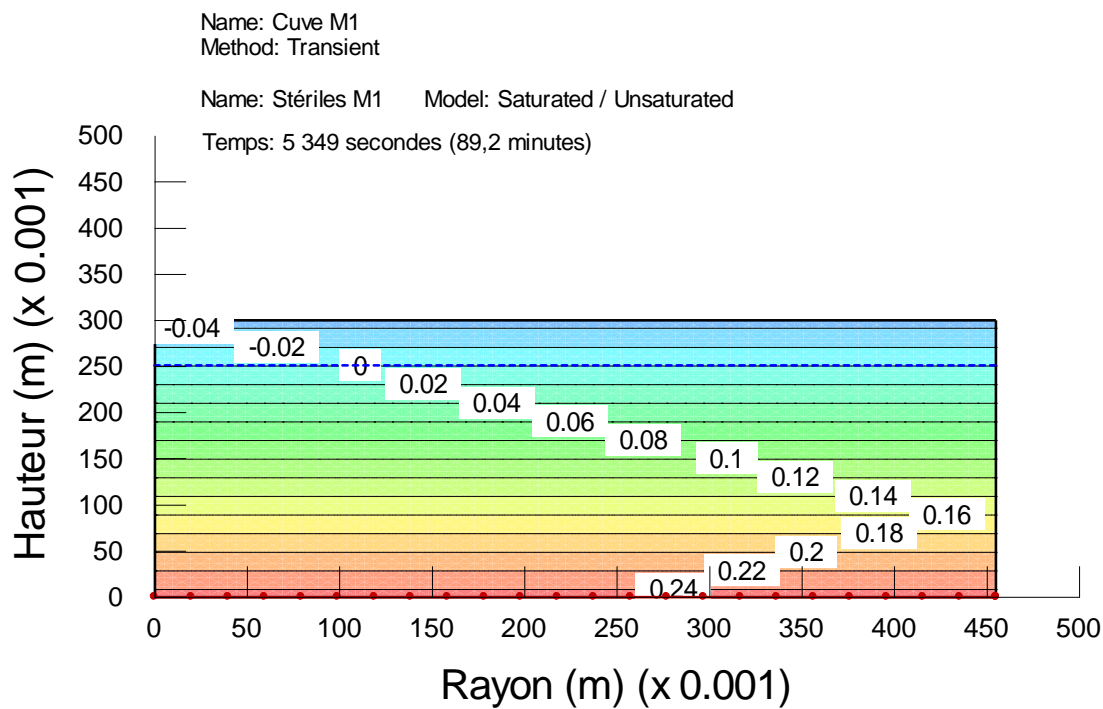


Figure E.10 : M1 en écoulement transitoire – à 5 349 secondes, charge de pression (m H₂O)

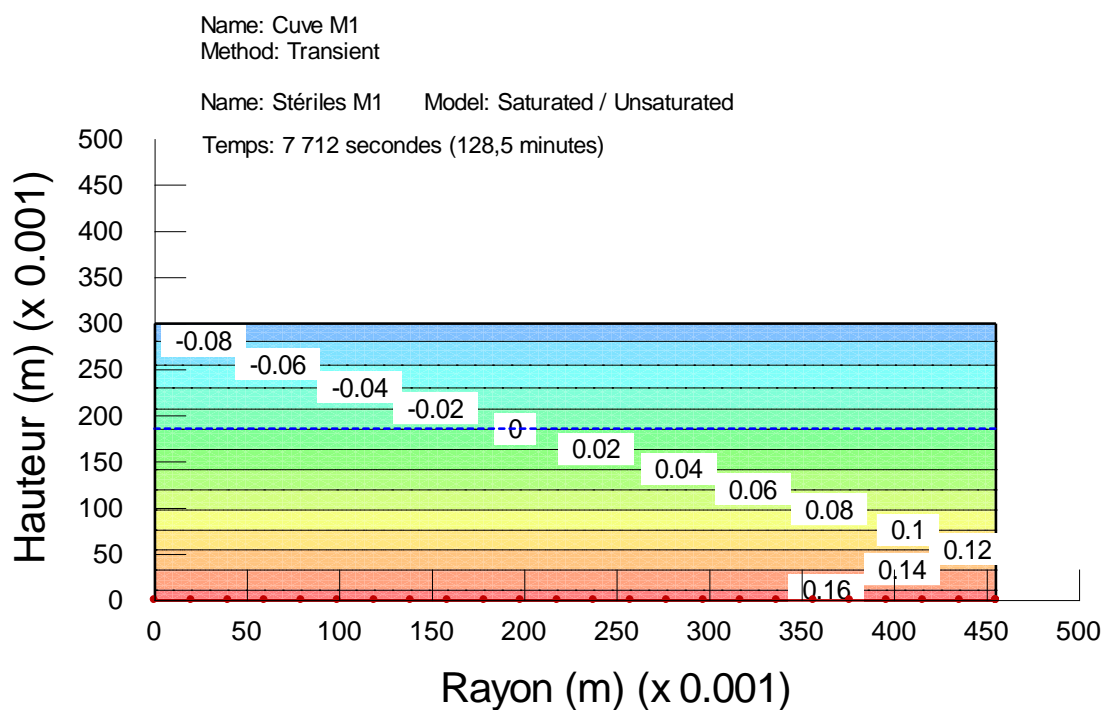


Figure E.11 : M1 en écoulement transitoire – à 5 349 secondes, charge de pression (m H₂O)

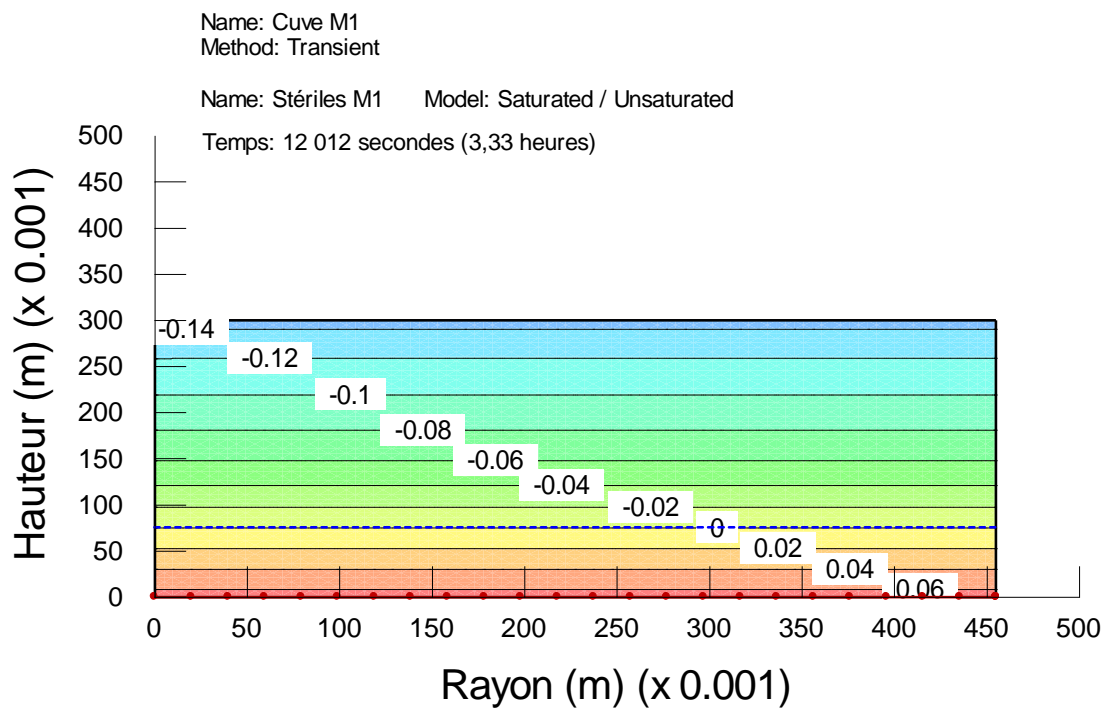


Figure E.12 : M1 en écoulement transitoire – à 12 012 secondes, charge de pression (m H₂O)

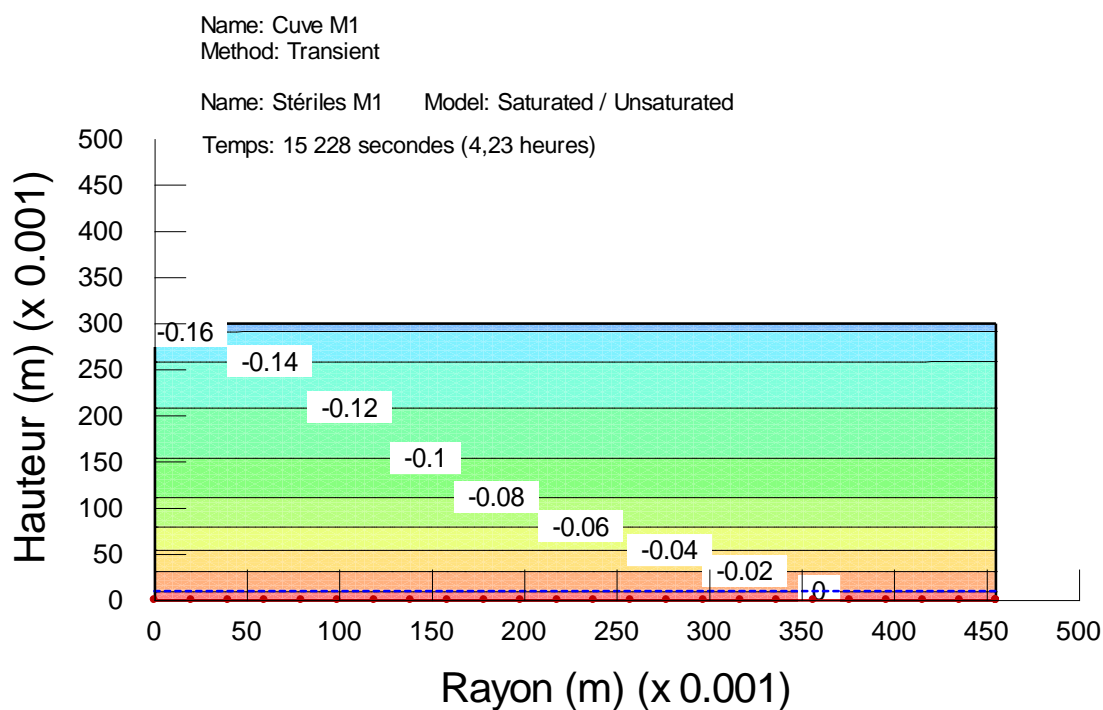


Figure E.13 : M1 en écoulement transitoire – à 15 228 secondes, charge de pression (m H₂O)

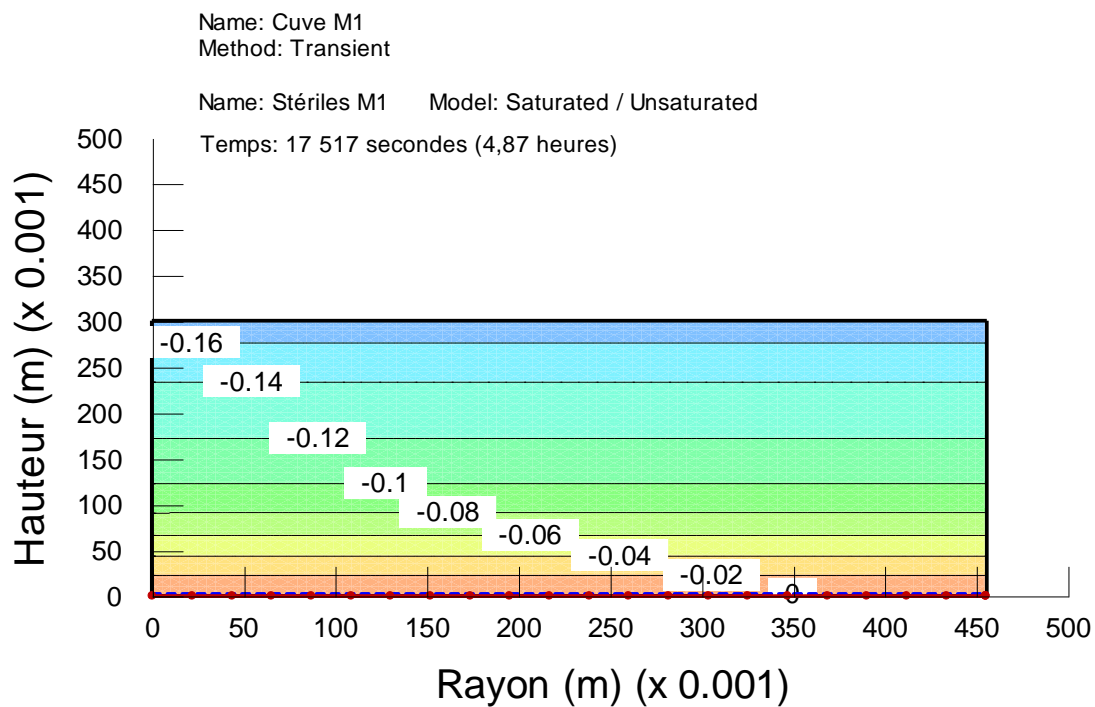


Figure E.14 : M1 en écoulement transitoire – à 17 517 secondes, charge de pression (m H₂O)

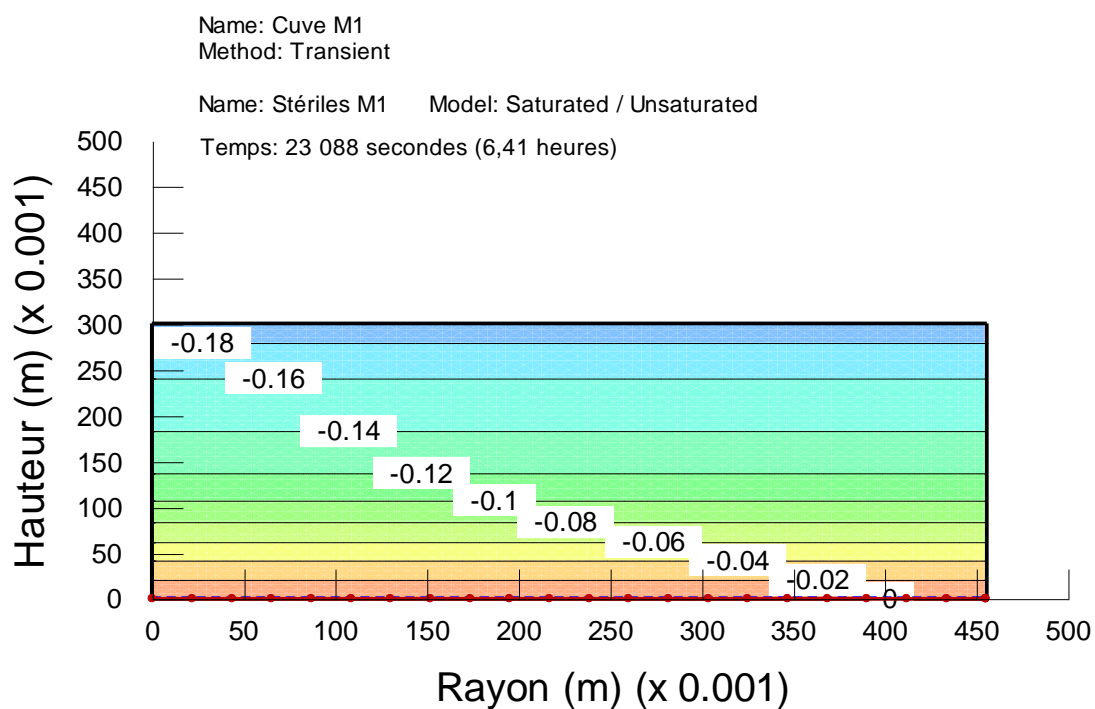


Figure E.15 : M1 en écoulement transitoire – à 23 088 secondes, charge de pression (m H₂O)

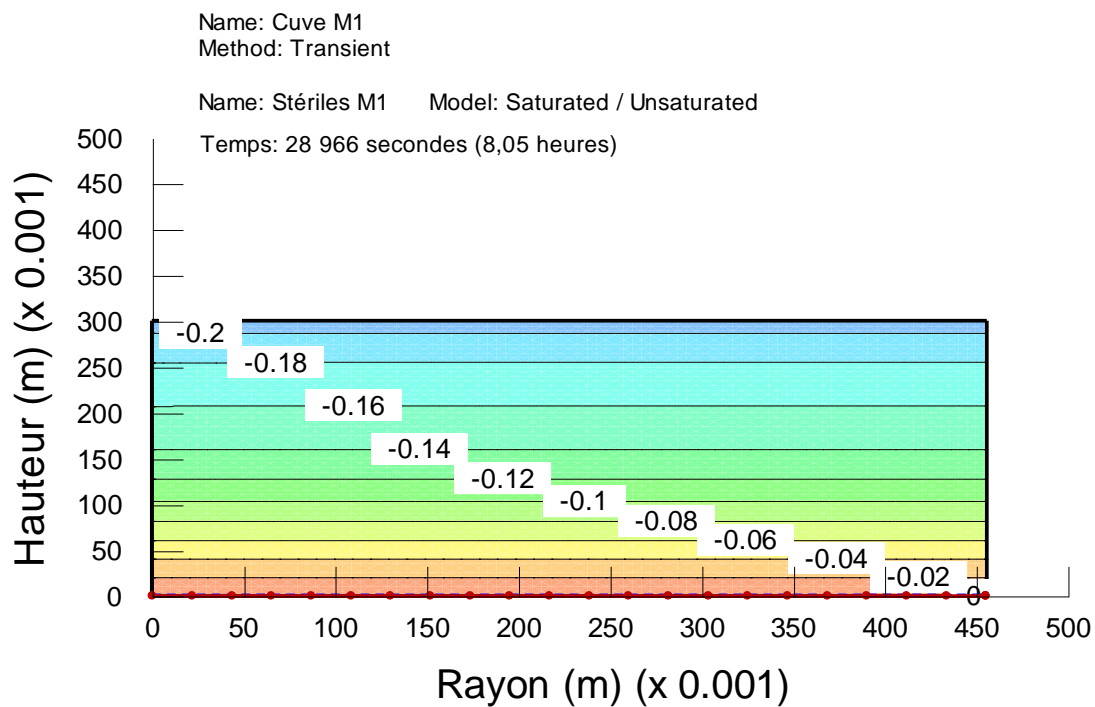


Figure E.16 : M1 en écoulement transitoire – à 28 966 secondes, charge de pression (m H₂O)

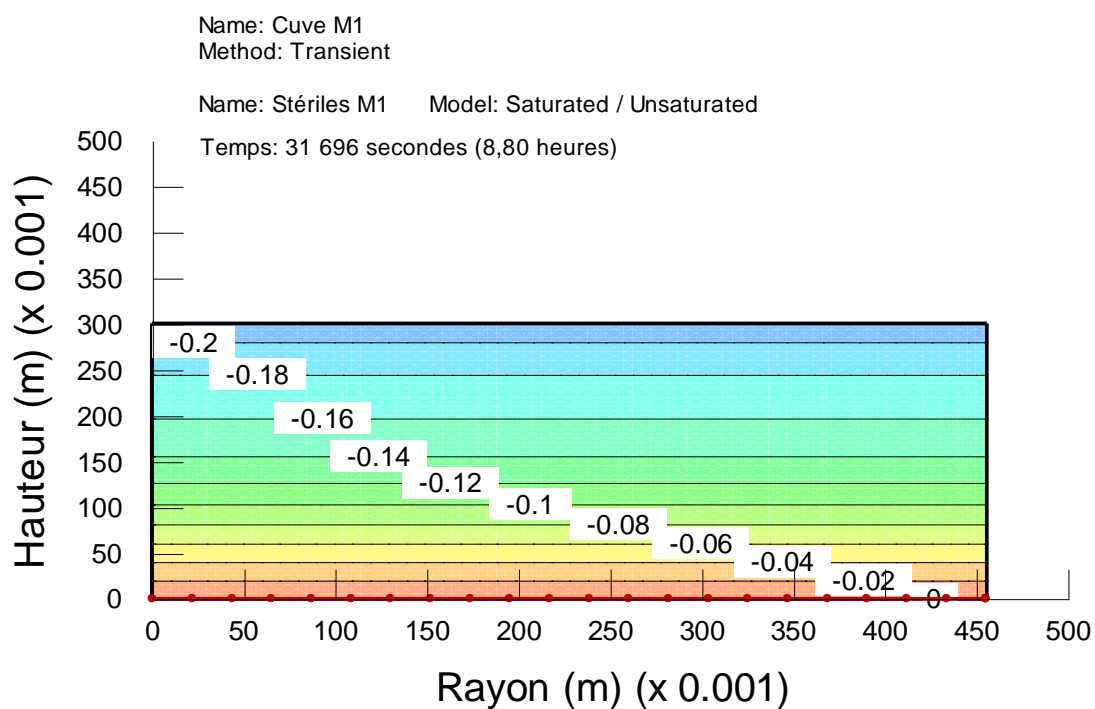


Figure E.17 : M1 en écoulement transitoire – à 31 696 secondes, charge de pression (m H₂O)

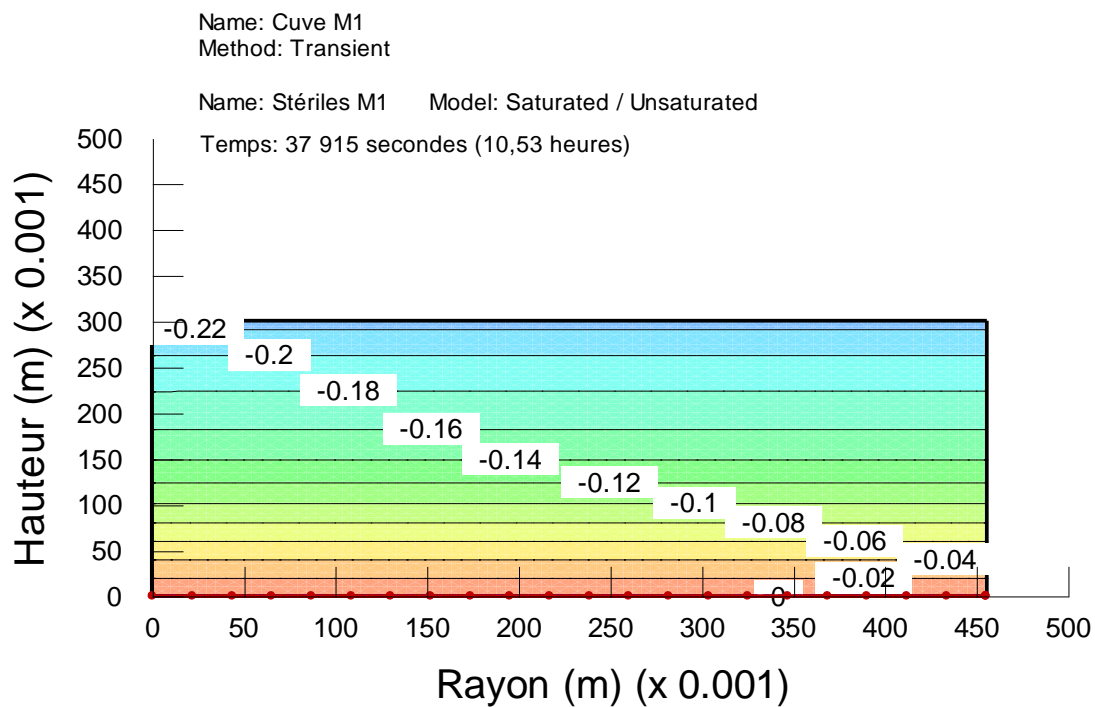


Figure E.18 : M1 en écoulement transitoire – à 37 915 secondes, charge de pression (m H₂O)

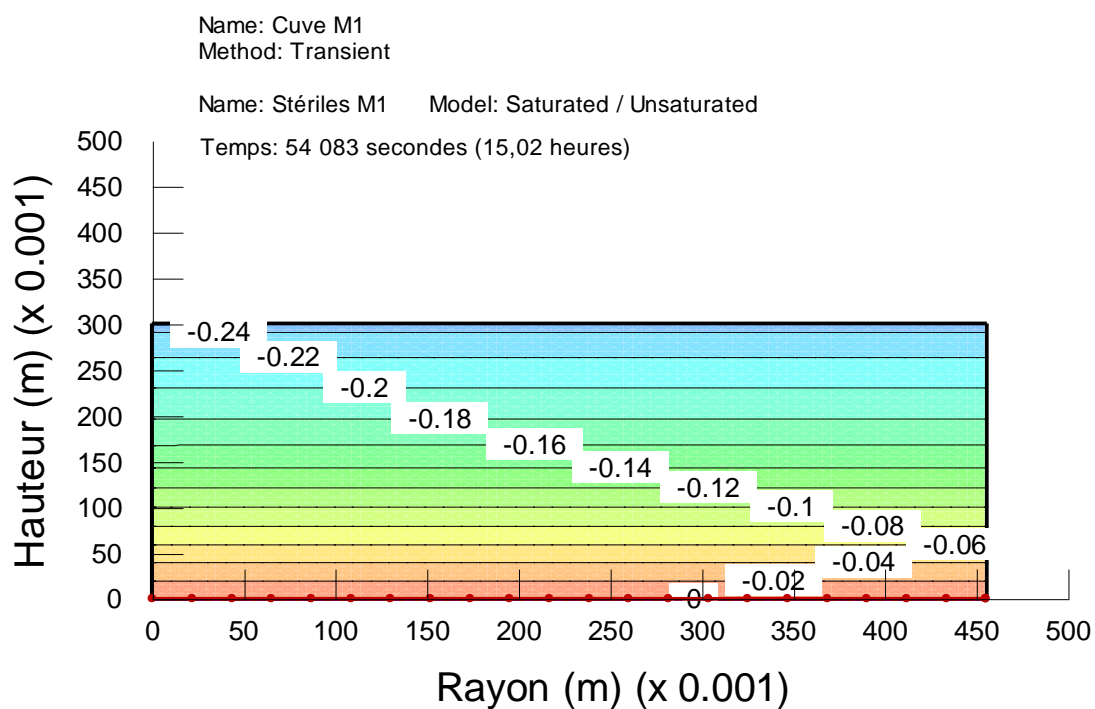


Figure E.19 : M1 en écoulement transitoire – à 54 083 secondes, charge de pression (m H₂O)

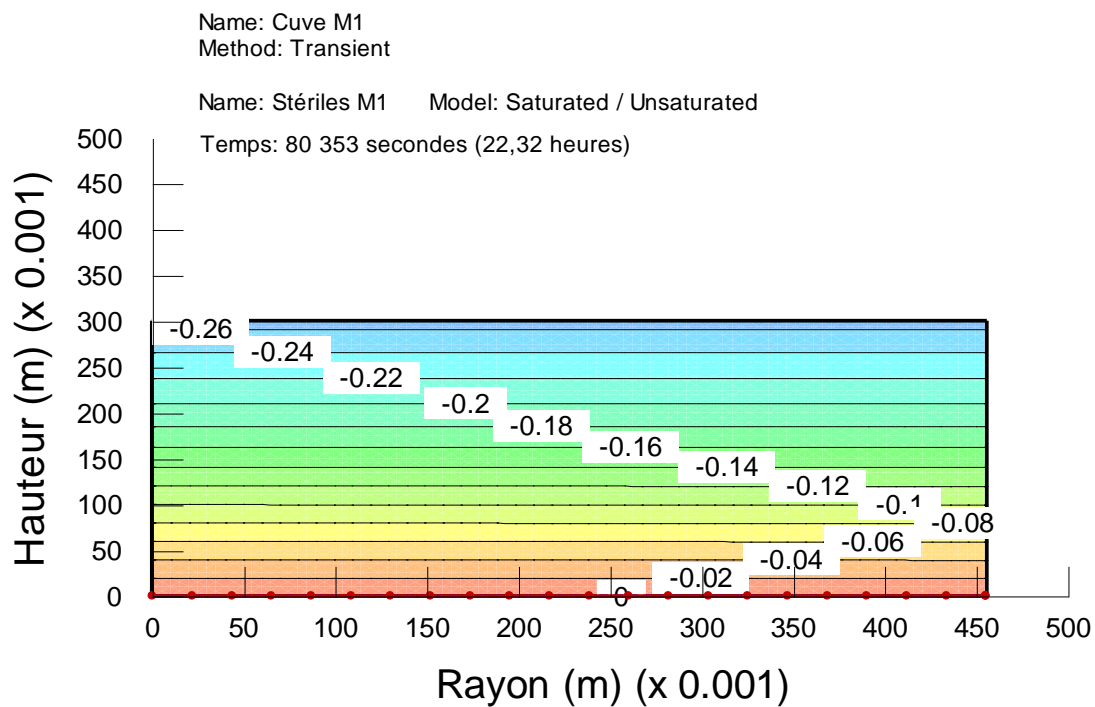


Figure E.20 : M1 en écoulement transitoire – à 80 353 secondes, charge de pression (m H₂O)

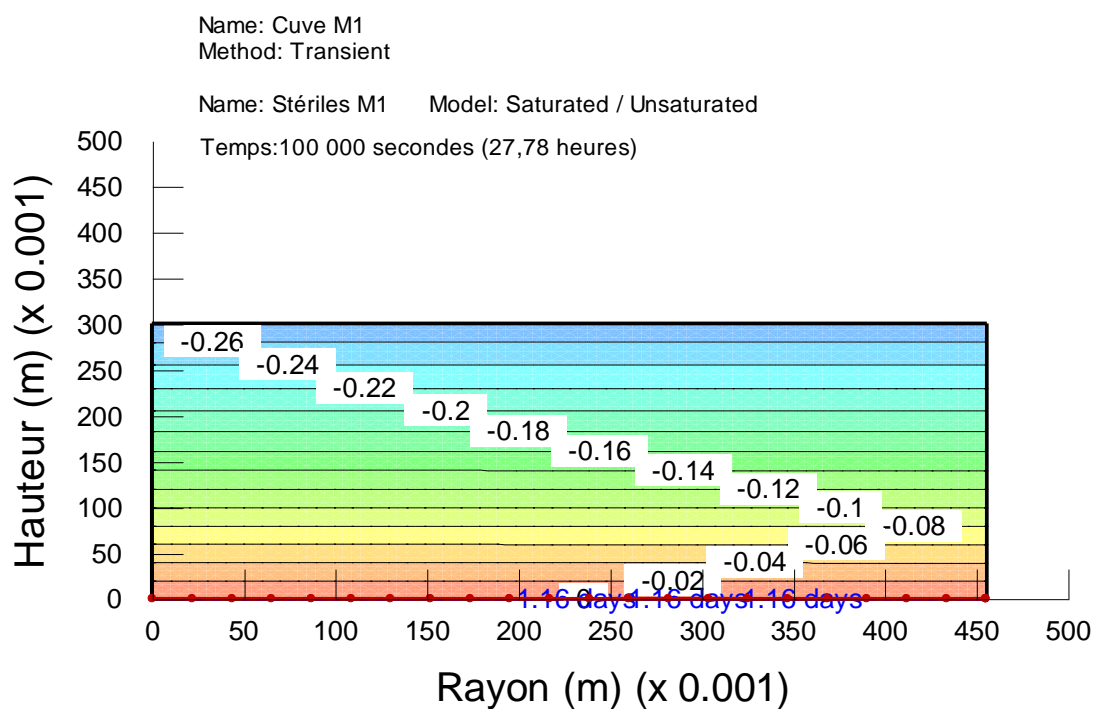


Figure E.21 : M1 en écoulement transitoire – à 100 000 secondes, charge de pression (m H₂O)

Simulation M2E2

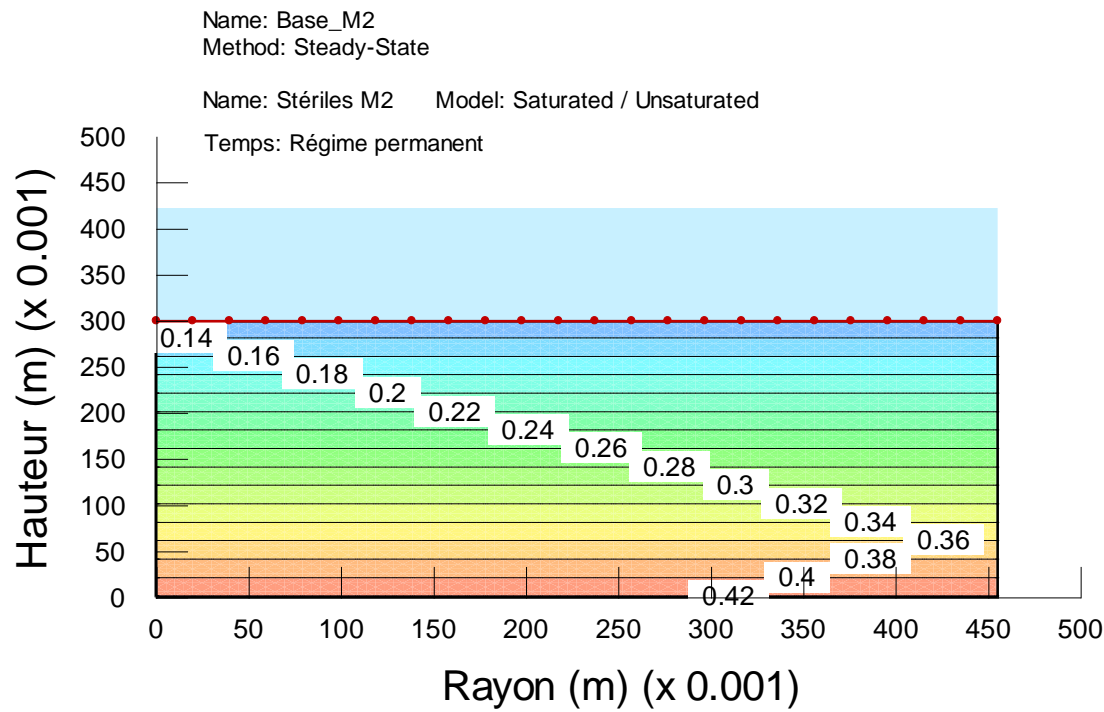


Figure E.22 : M2 est écoulement permanent, charge de pression (m H₂O)

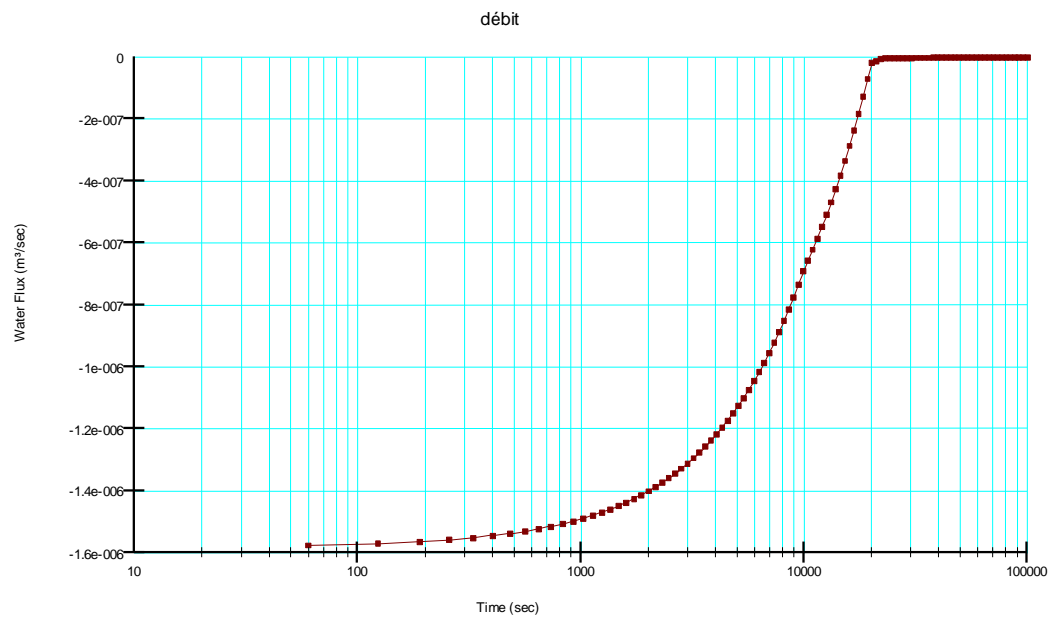


Figure E.23 : M2 débit en fonction du temps

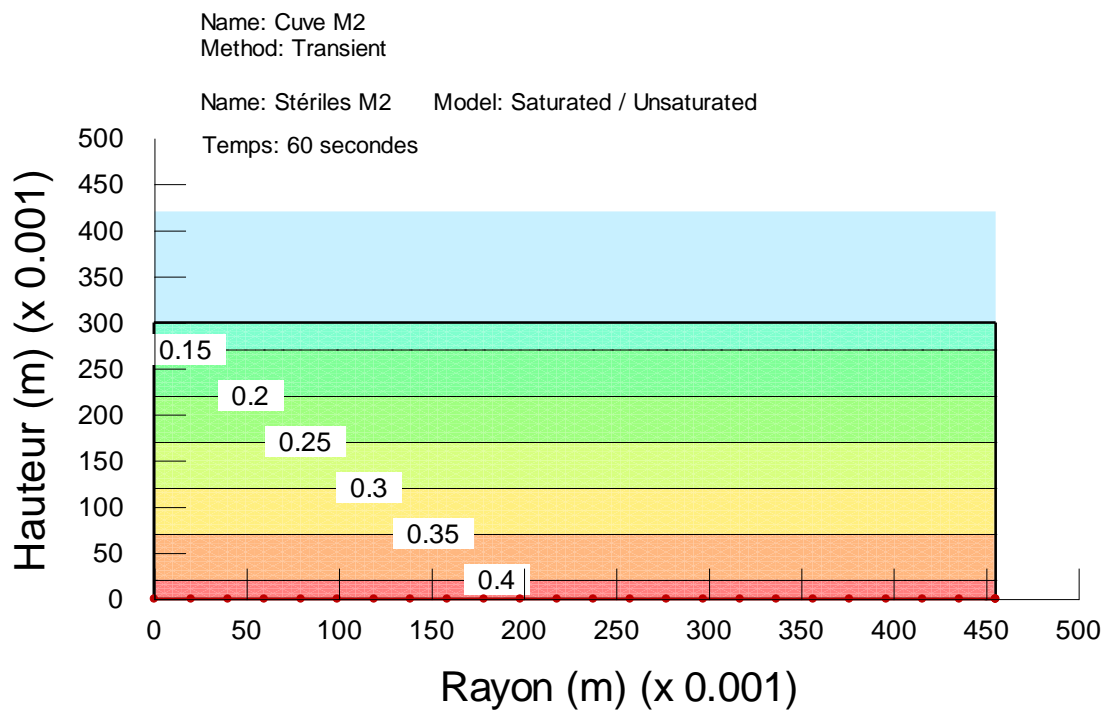


Figure E.24 : M2 en écoulement transitoire – à 60 secondes, charge de pression (m H₂O)

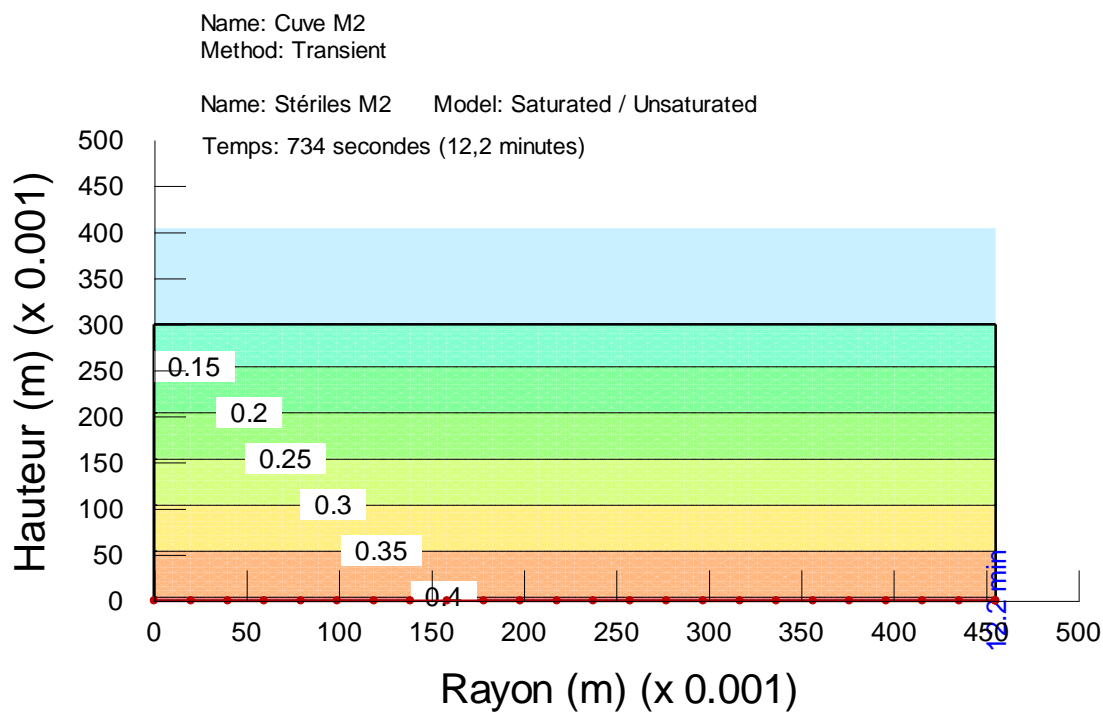


Figure E.25 : M2 en écoulement transitoire – à 734 secondes, charge de pression (m H₂O)

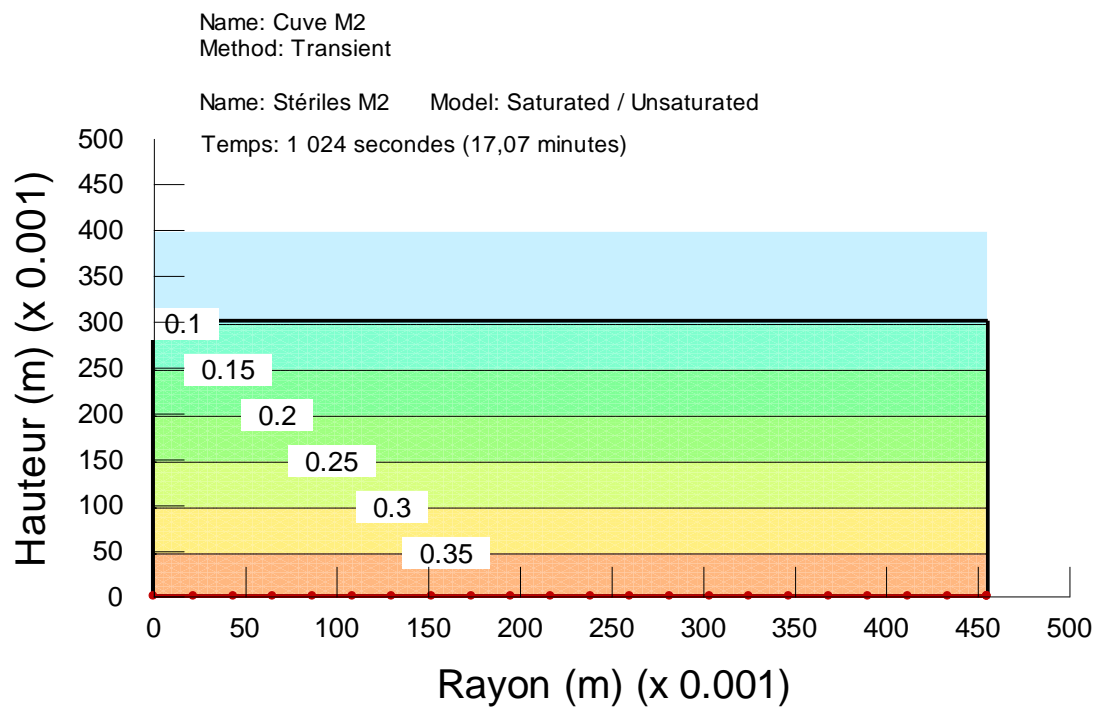


Figure E.26 : M2 en écoulement transitoire – à 1 024 secondes, charge de pression (m H₂O)

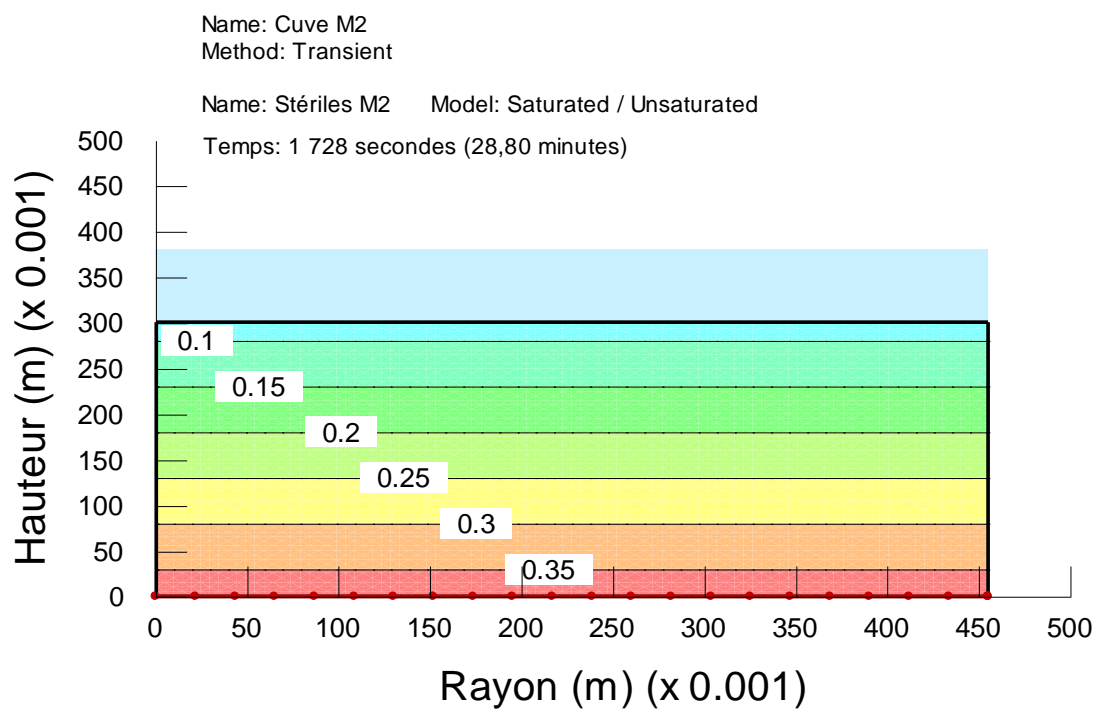


Figure E.27 : M2 en écoulement transitoire – à 1 728 secondes, charge de pression (m H₂O).

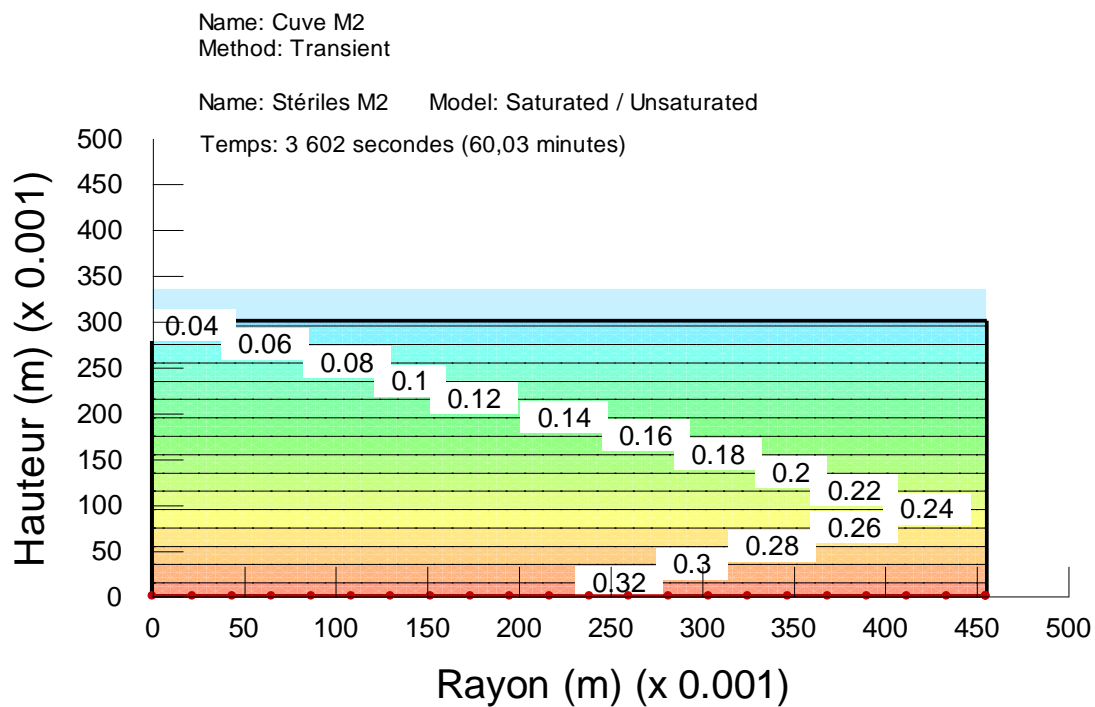


Figure E.28 : M2 en écoulement transitoire – à 3 602 secondes, charge de pression (m H₂O).

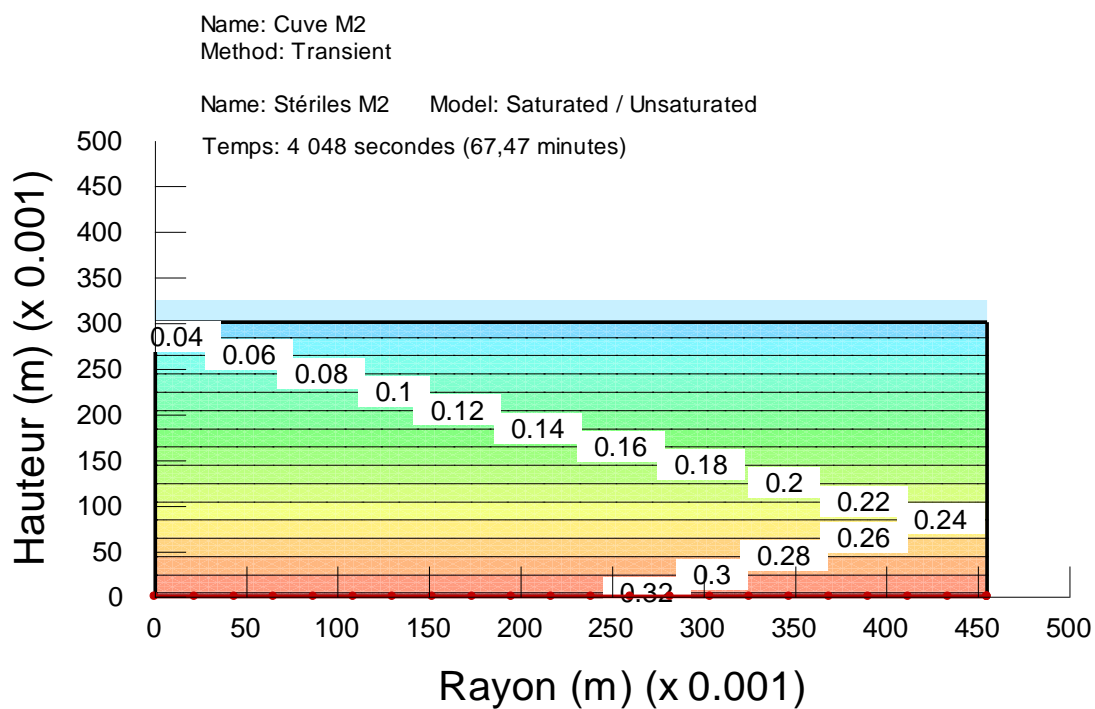


Figure E.29 : M2 en écoulement transitoire – à 4 048 secondes, charge de pression (m H₂O).

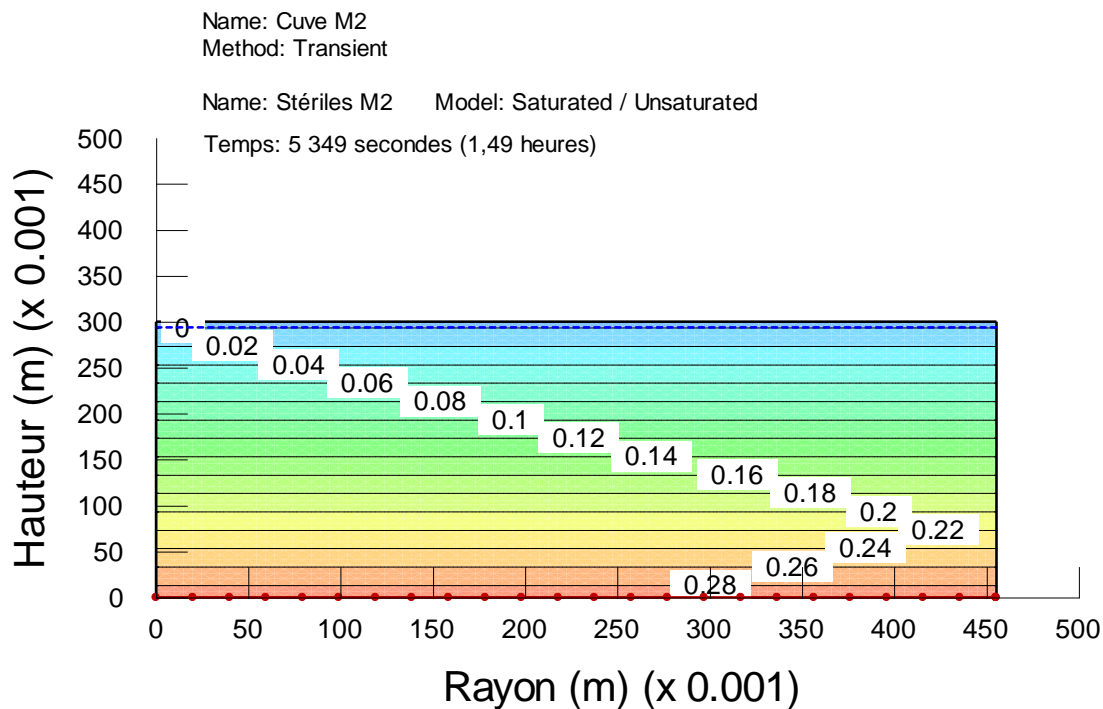


Figure E.30 : M2 en écoulement transitoire – à 5 349 secondes, charge de pression (m H₂O).

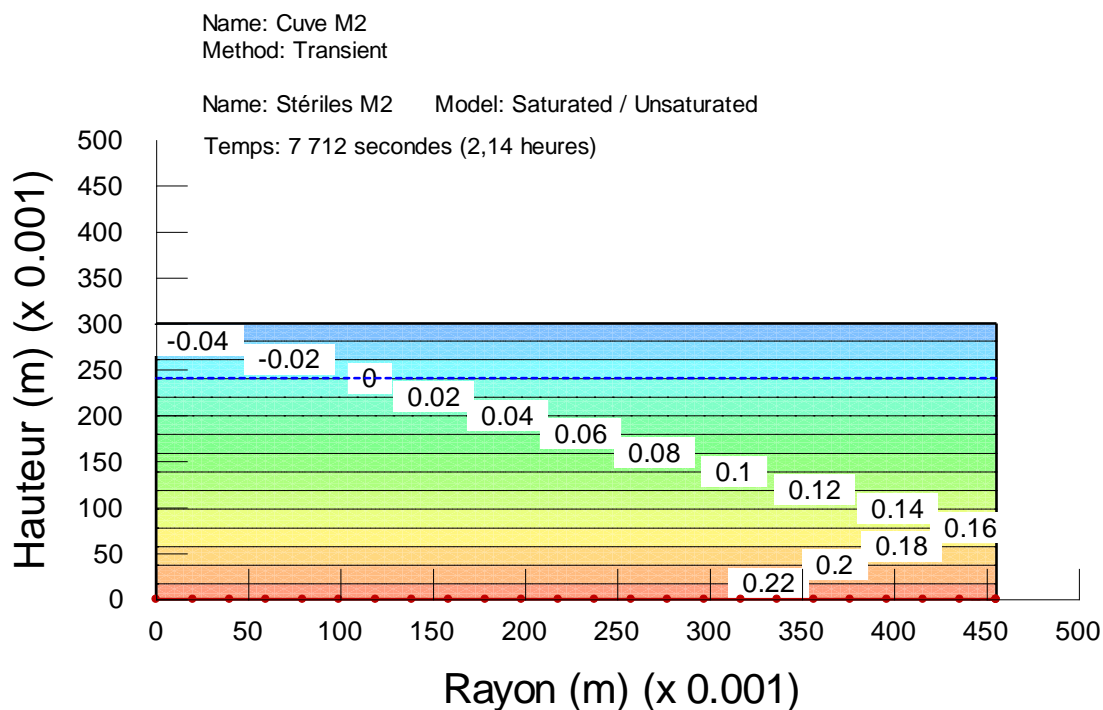


Figure E.31 : M2 en écoulement transitoire – à 7 712 secondes, charge de pression (m H₂O).

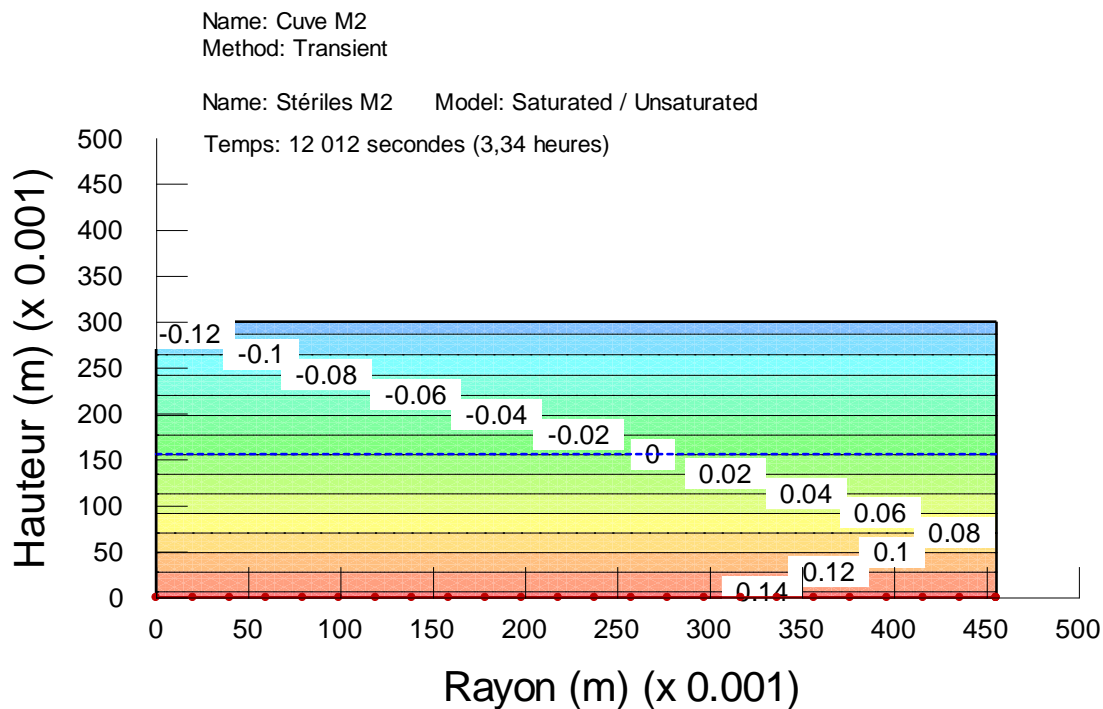


Figure E.32 : M2 en écoulement transitoire – à 12 012 secondes, charge de pression (m H₂O).

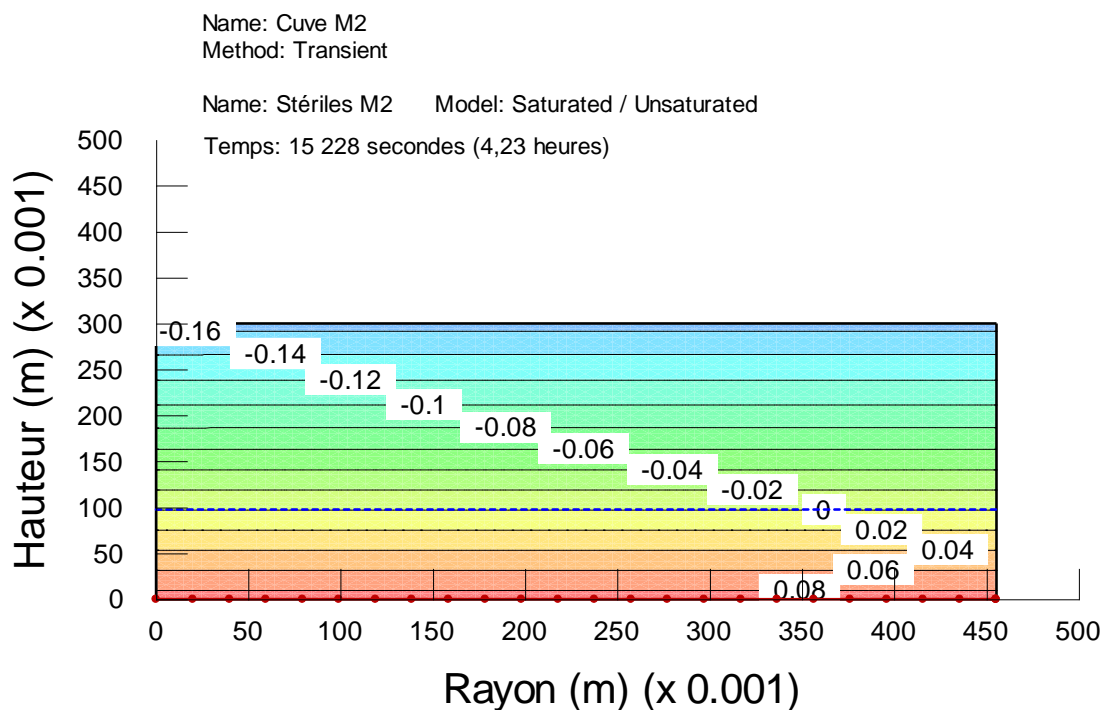


Figure E.33 : M2 en écoulement transitoire – à 15 228 secondes, charge de pression (m H₂O).

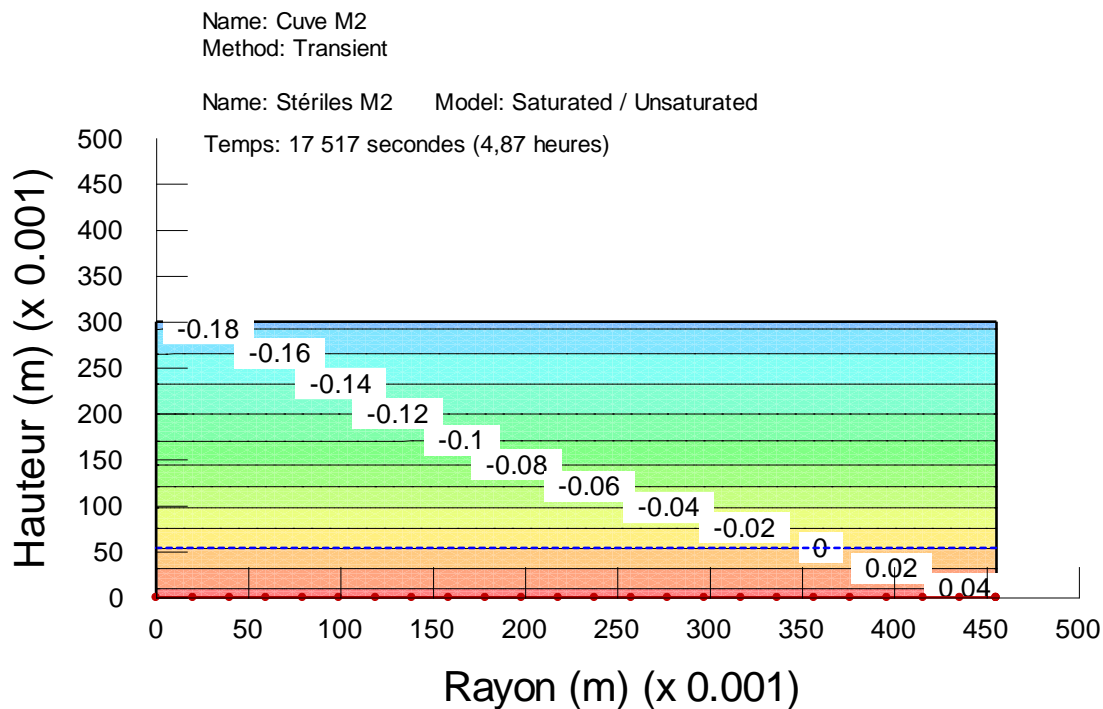


Figure E.34 : M2 en écoulement transitoire – à 17 517 secondes, charge de pression (m H₂O).

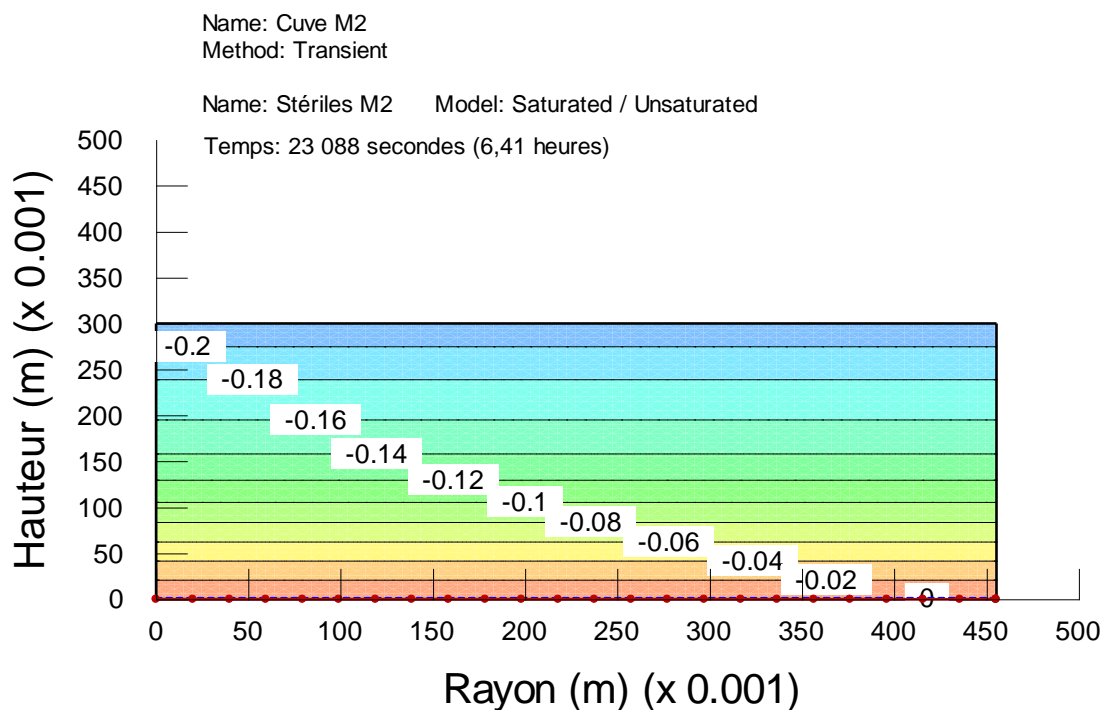


Figure E.35 : M2 en écoulement transitoire – à 23 088 secondes, charge de pression (m H₂O).

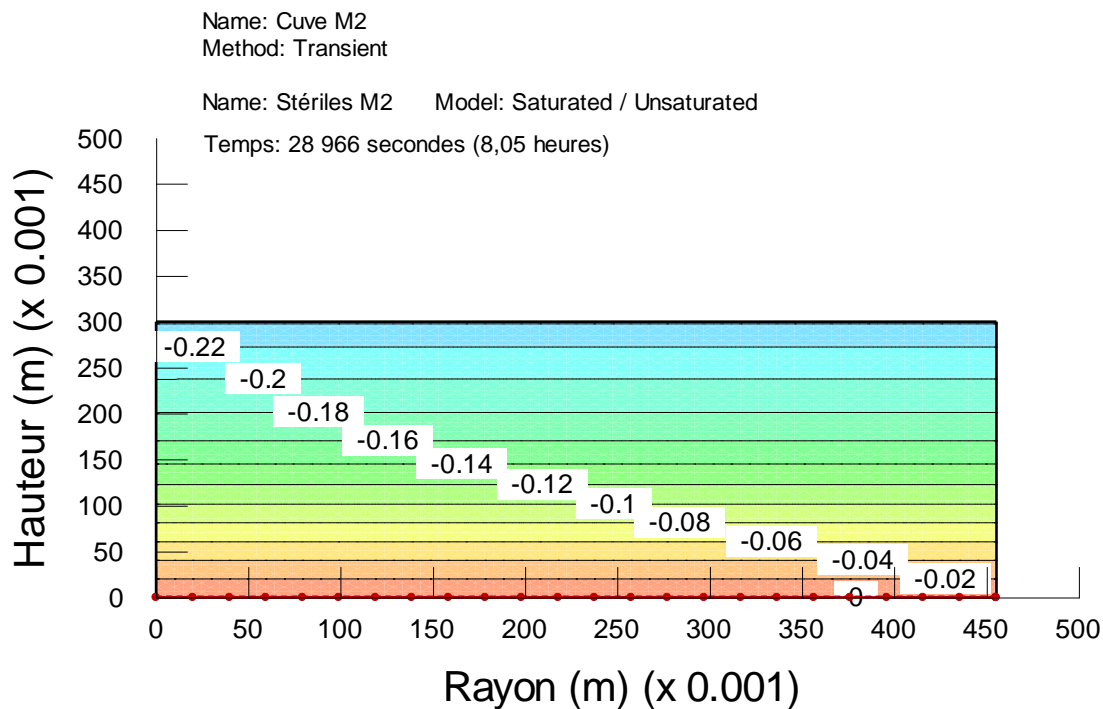


Figure E.36 : M2 en écoulement transitoire – à 28 966 secondes, charge de pression (m H₂O).

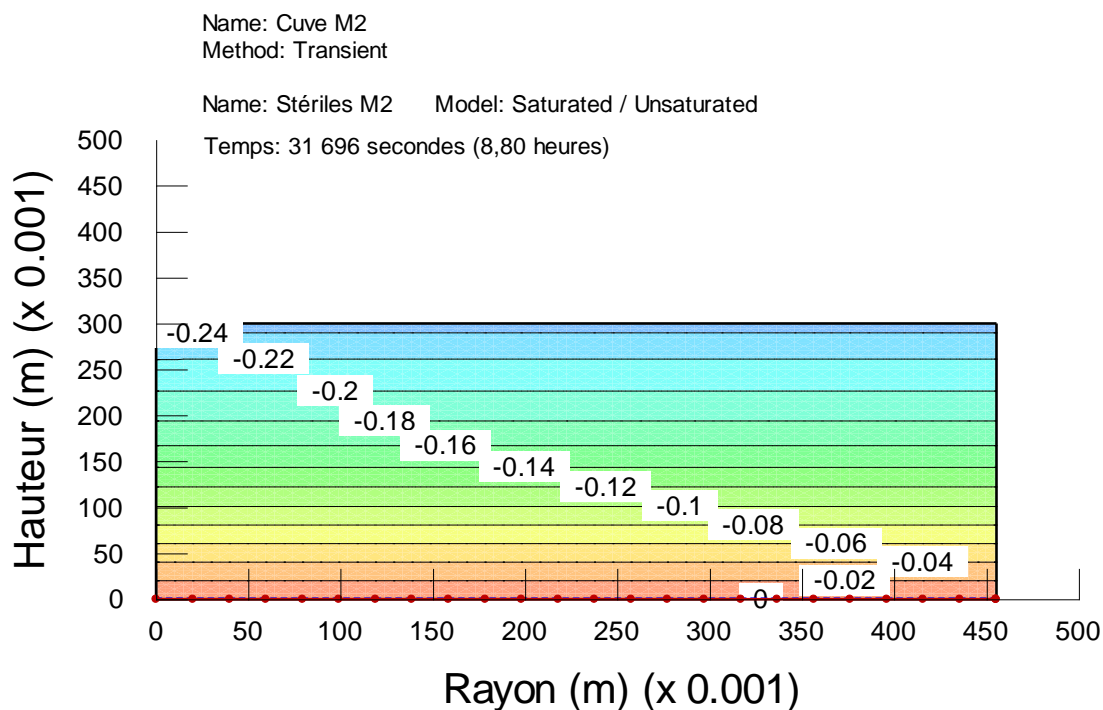


Figure E.37 : M2 en écoulement transitoire – à 31 696 secondes, charge de pression (m H₂O).

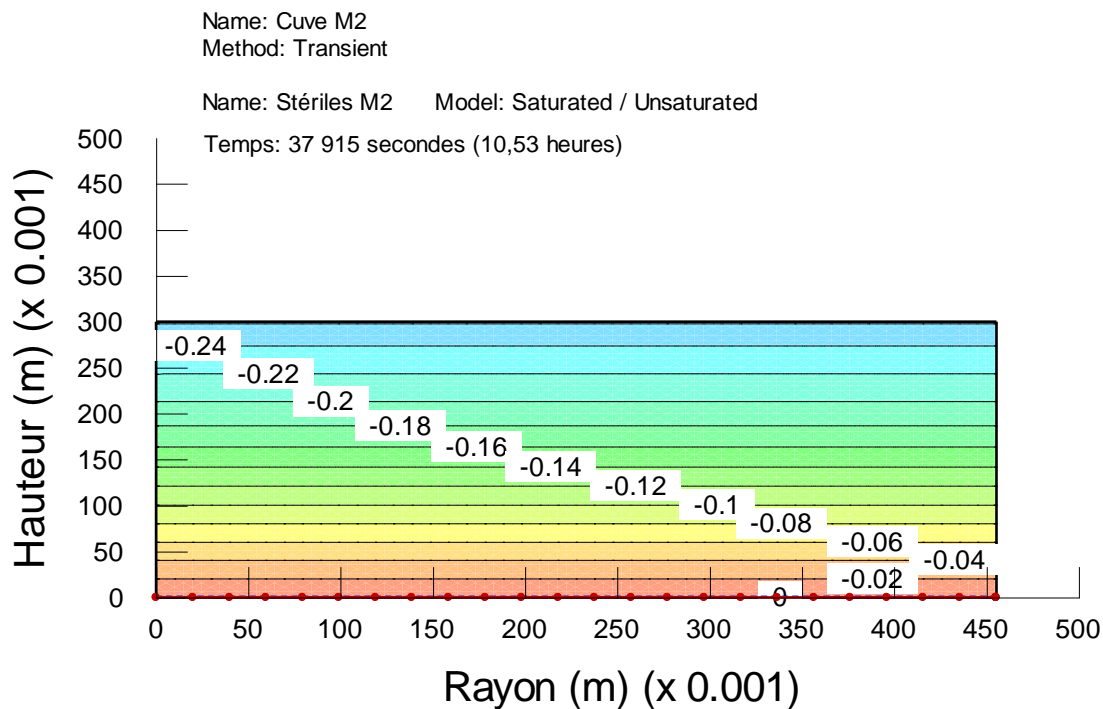


Figure E.38 : M2 en écoulement transitoire – à 37 915 secondes, charge de pression (m H₂O).

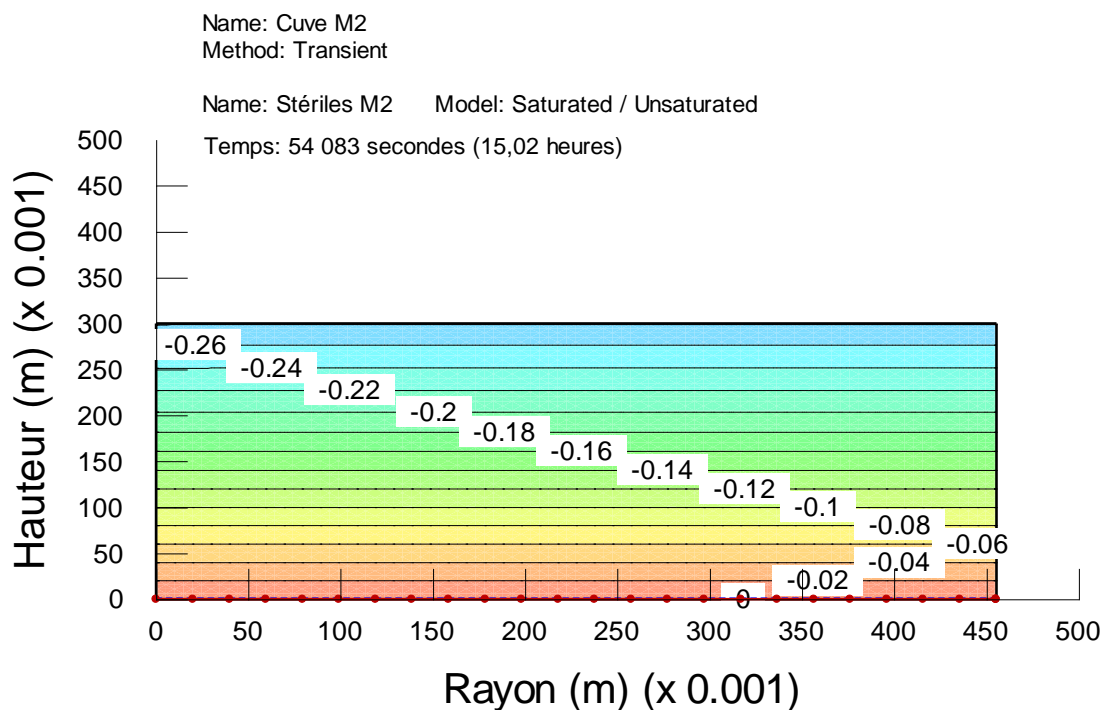


Figure E.39 : M2 en écoulement transitoire – à 54 083 secondes, charge de pression (m H₂O).

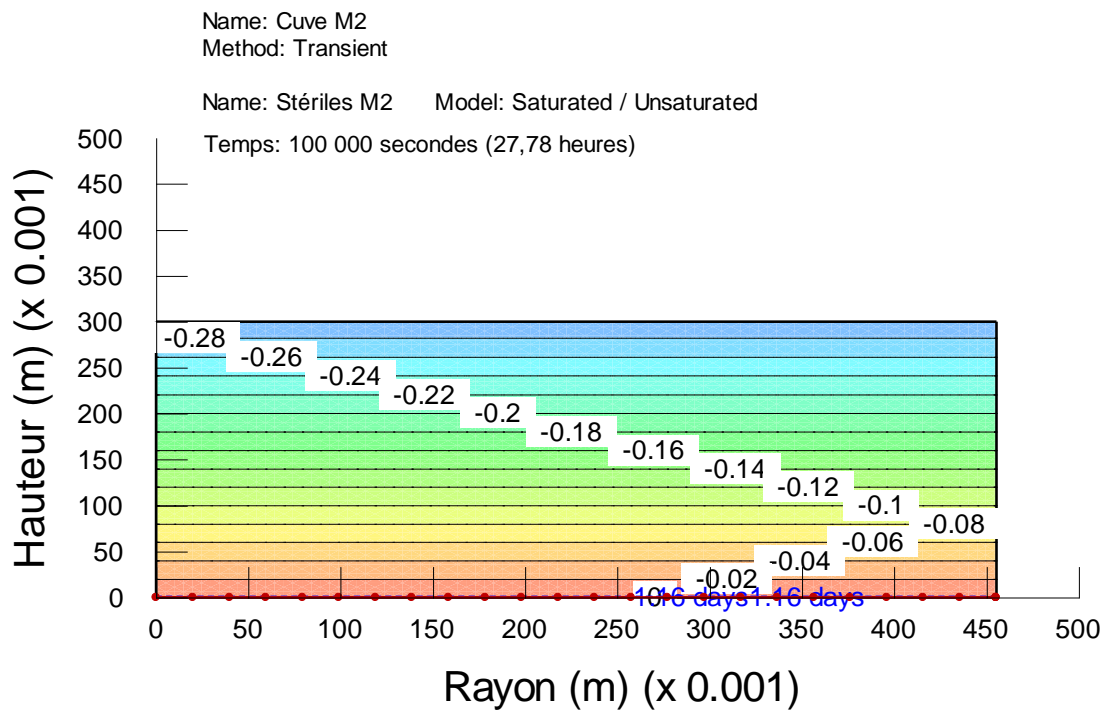


Figure E.40 : M2 en écoulement transitoire – à 100 000 secondes, charge de pression (m H₂O).

Simulation M3E2

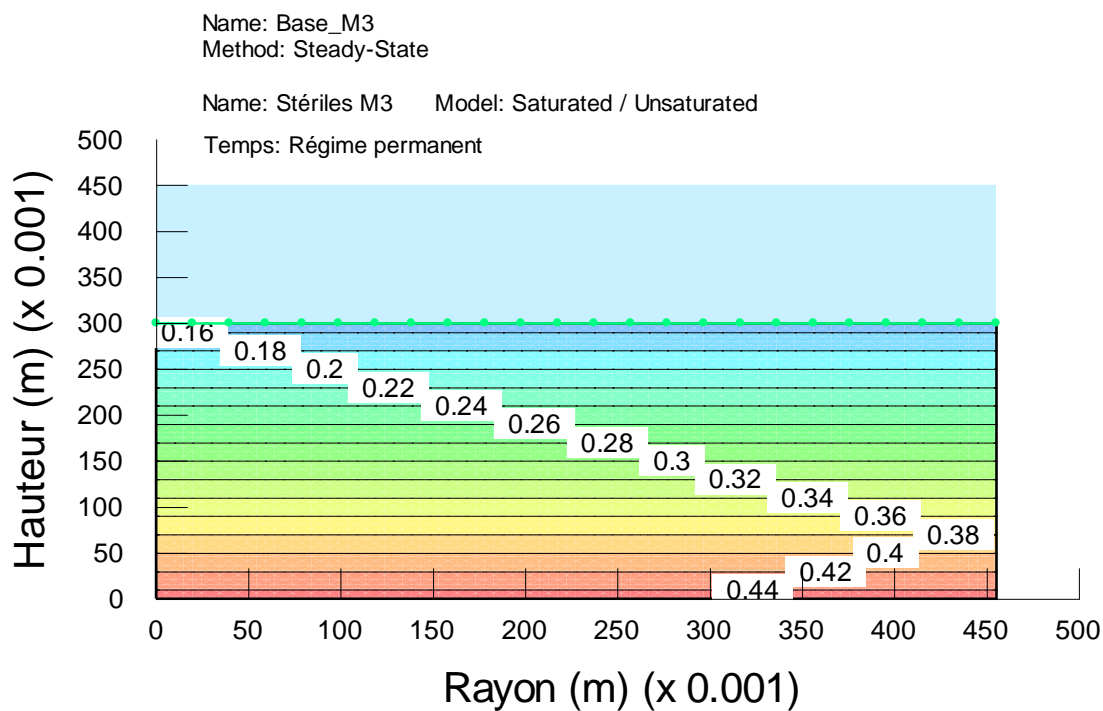


Figure E.41 : M3 en écoulement permanent, charge de pression (m H₂O).

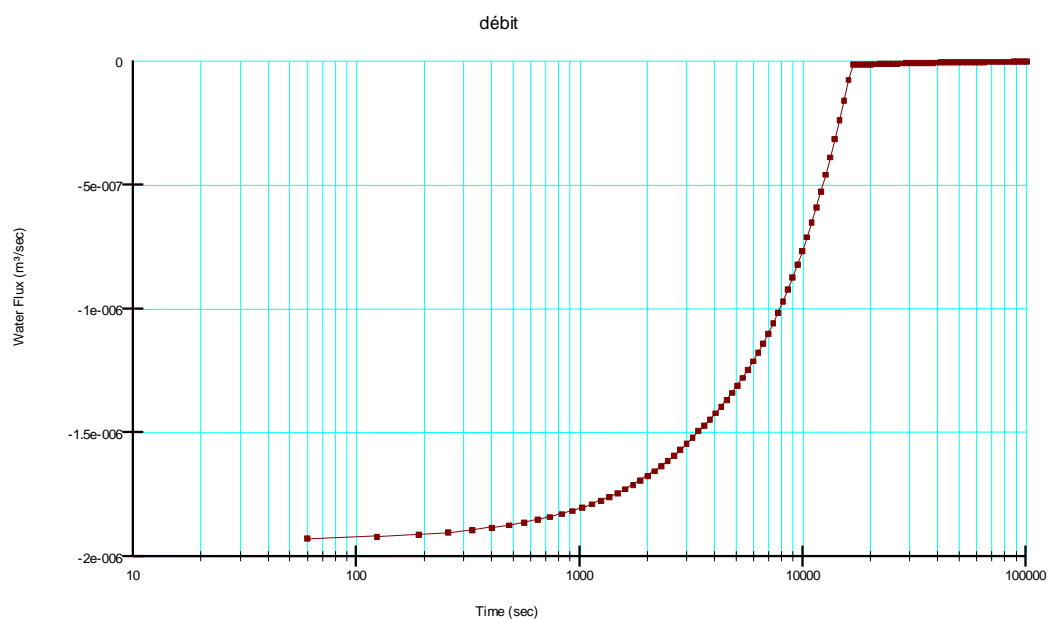


Figure E.42 : M3 débit en fonction du temps.

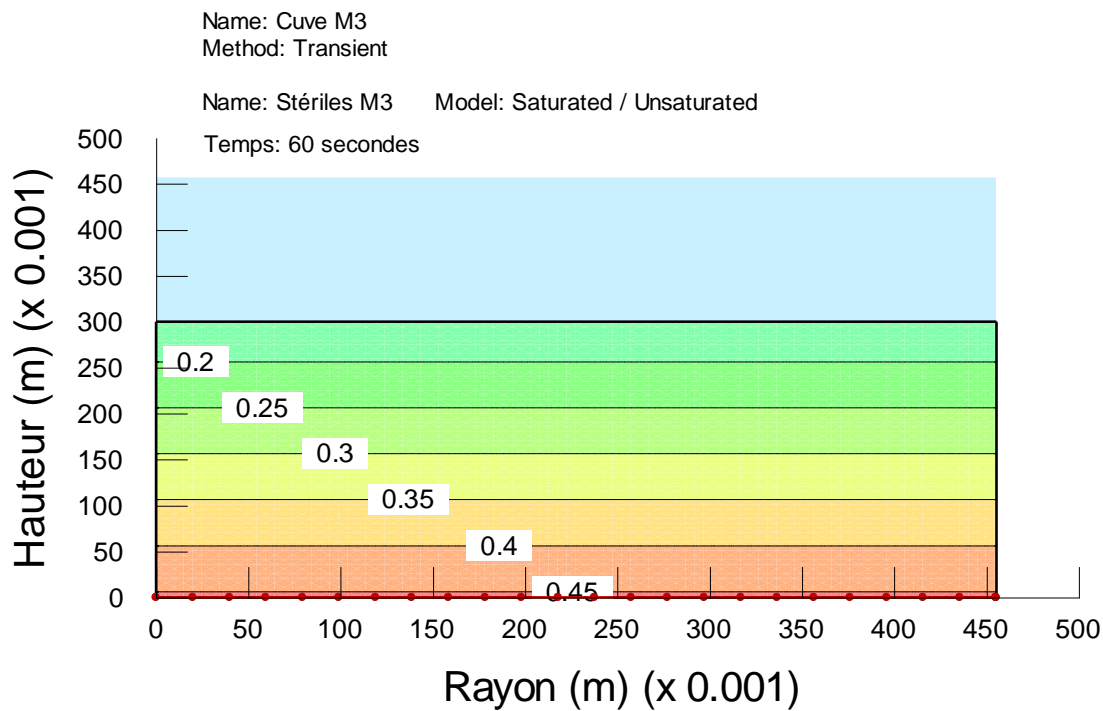


Figure E.43 : M3 en écoulement transitoire – à 60 secondes, charge de pression (m H₂O).

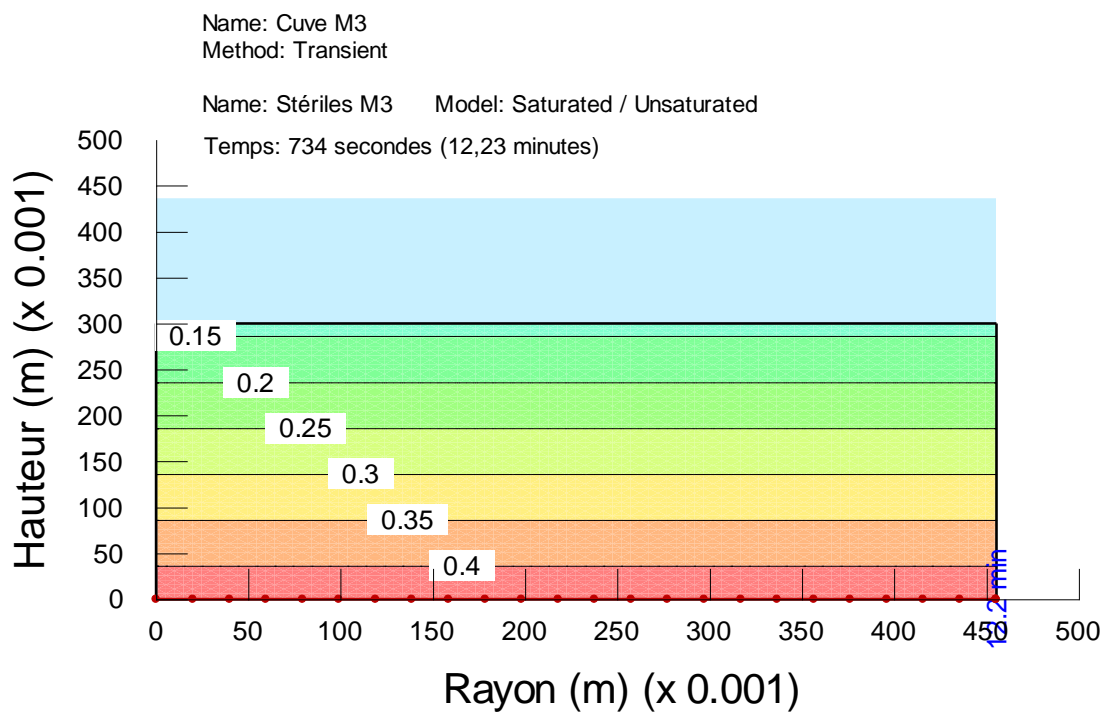


Figure E.44 : M3 en écoulement transitoire – à 734 secondes, charge de pression (m H₂O).

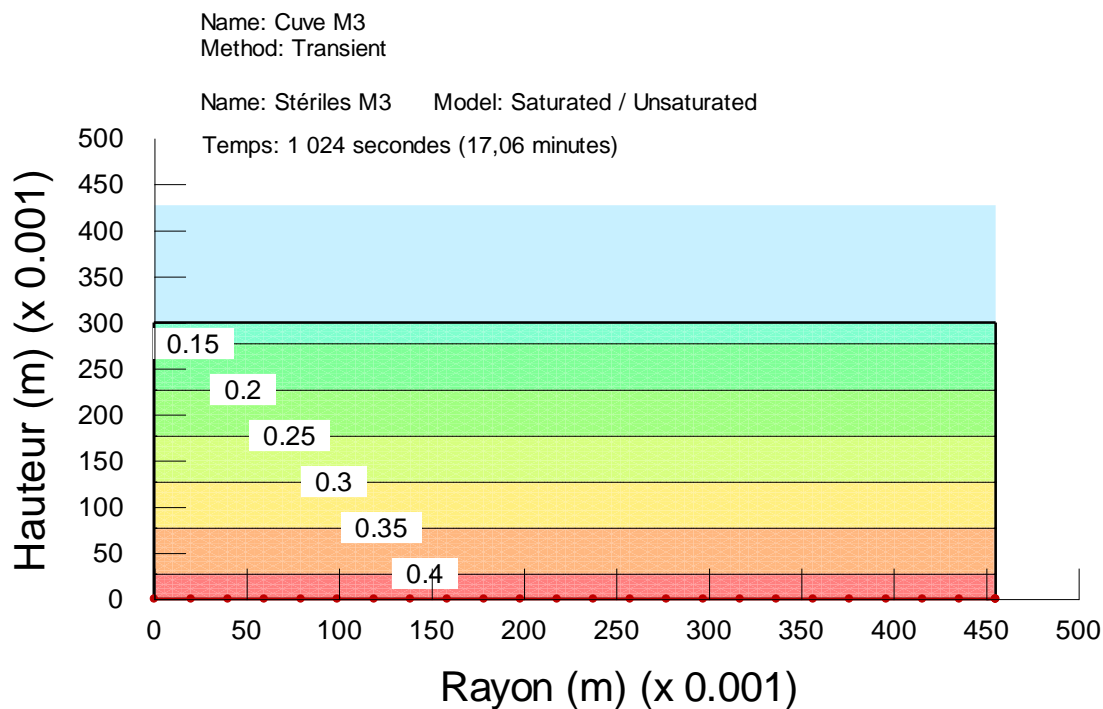


Figure E.45 : M3 en écoulement transitoire – à 1 024 secondes, charge de pression (m H₂O).

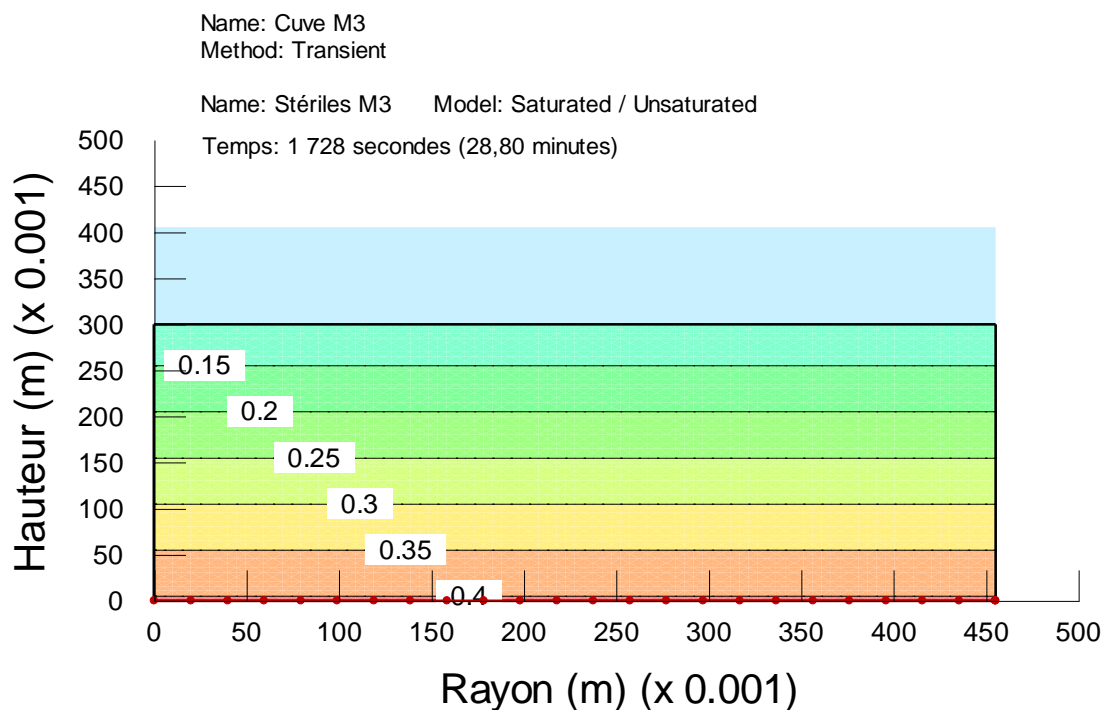


Figure E.46 : M3 en écoulement transitoire – à 1 728 secondes, charge de pression (m H₂O).

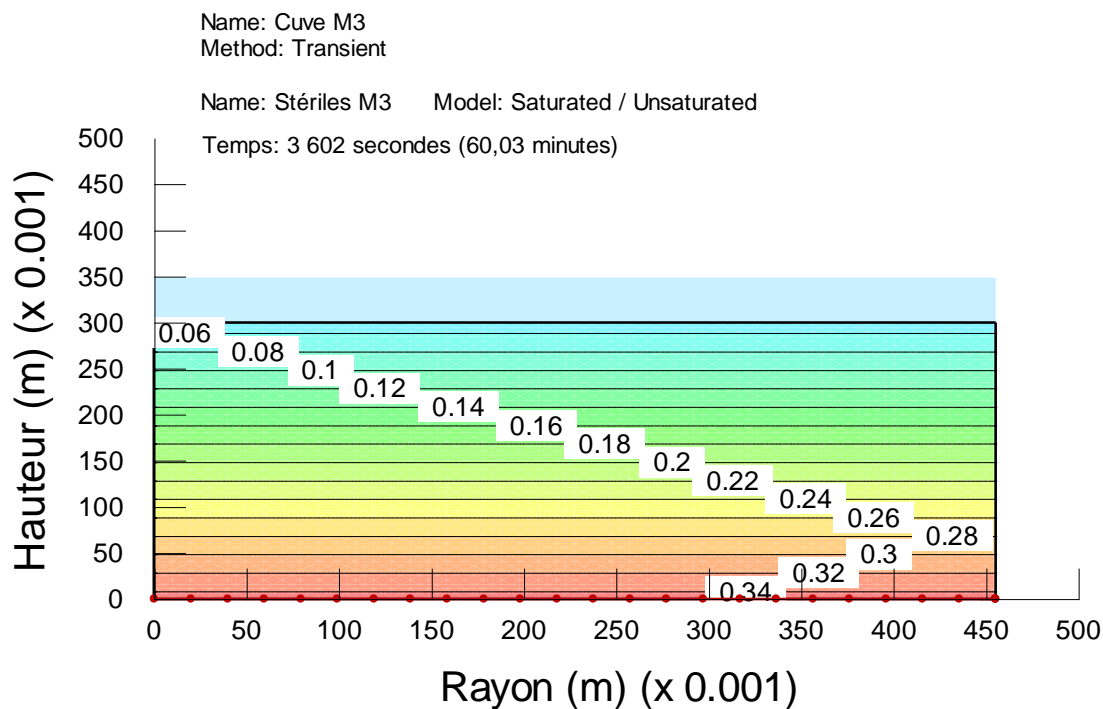


Figure E.47 : M3 en écoulement transitoire – à 3 602 secondes, charge de pression (m H₂O).

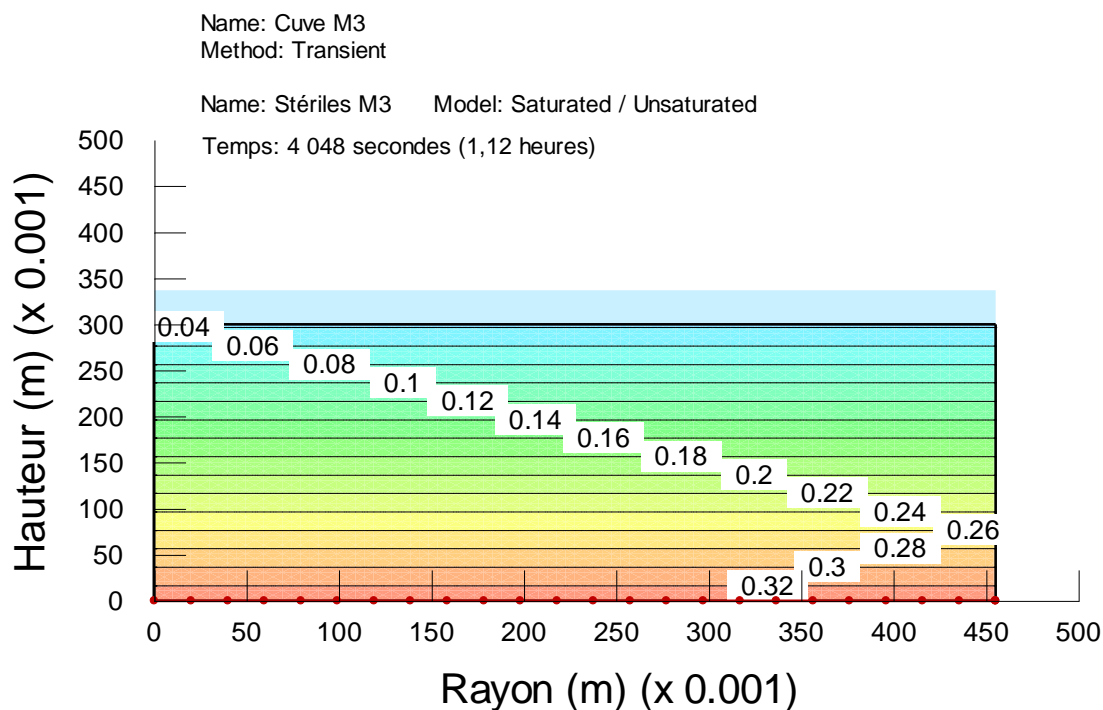


Figure E.48 : M3 en écoulement transitoire – à 4 048 secondes, charge de pression (m H₂O).

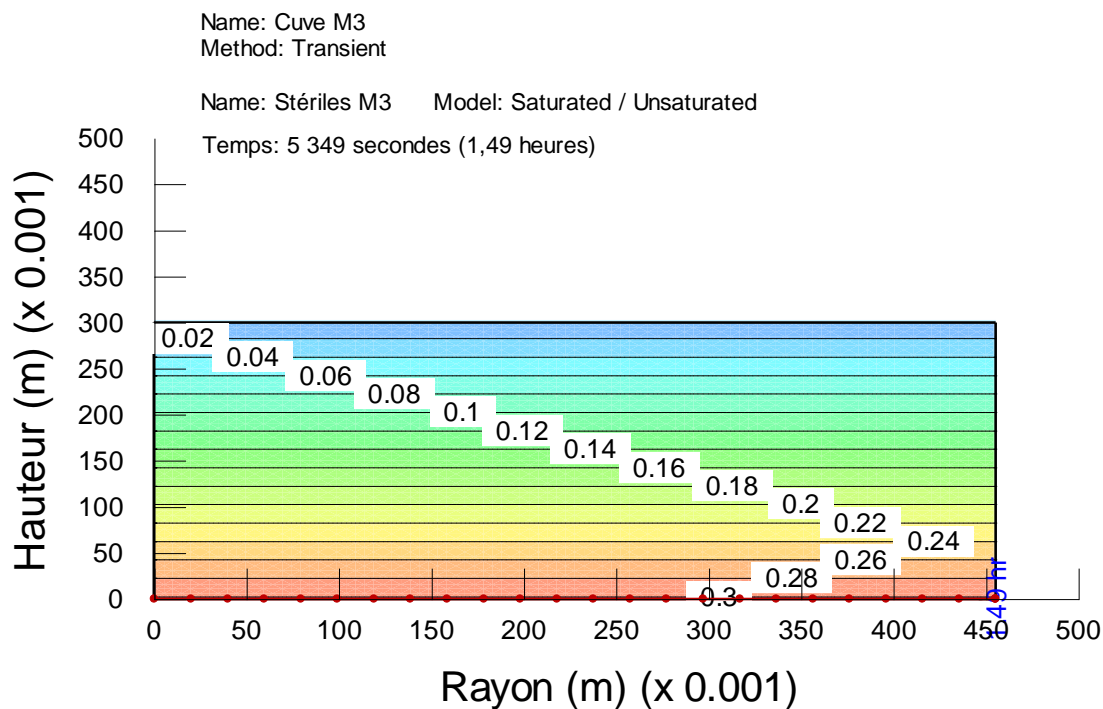


Figure E.49 : M3 en écoulement transitoire – à 5 349 secondes, charge de pression (m H₂O).

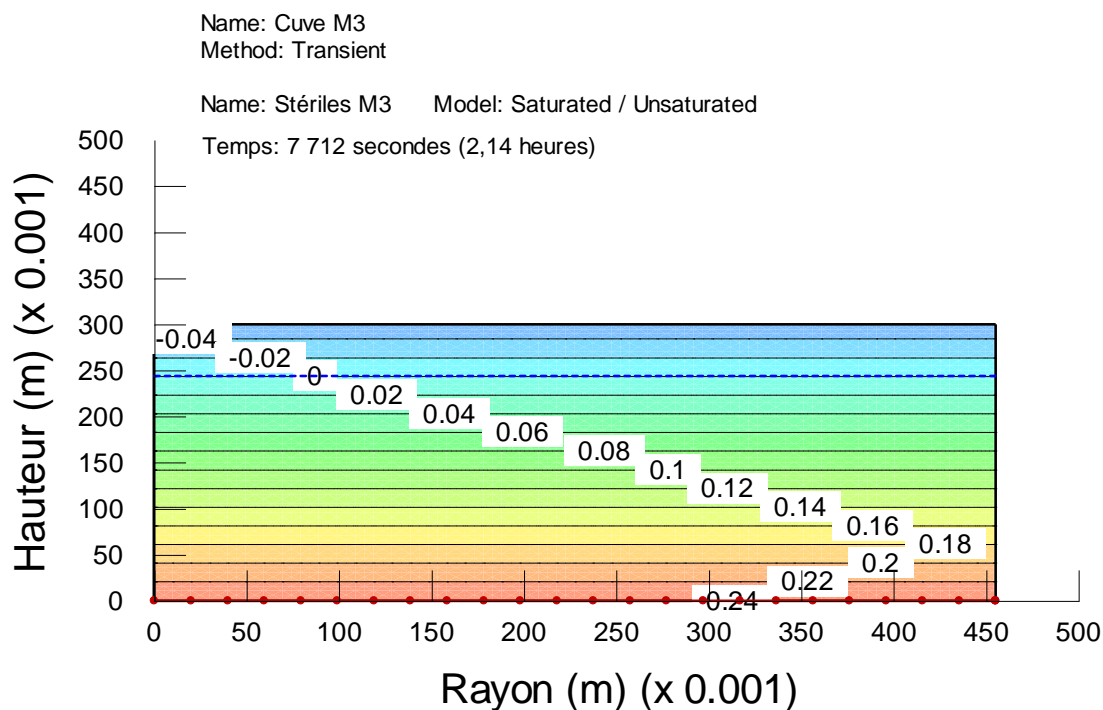


Figure E.50 : M3 en écoulement transitoire – à 7 712 secondes, charge de pression (m H₂O).

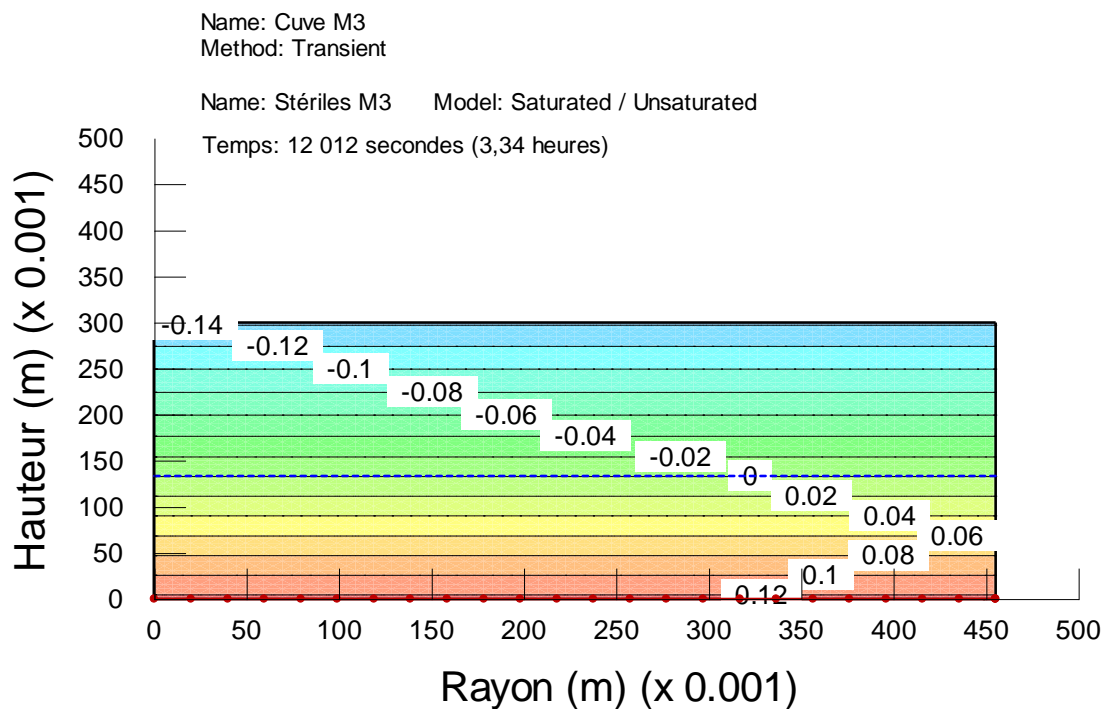


Figure E.51 : M3 en écoulement transitoire – à 12 012 secondes, charge de pression (m H₂O).

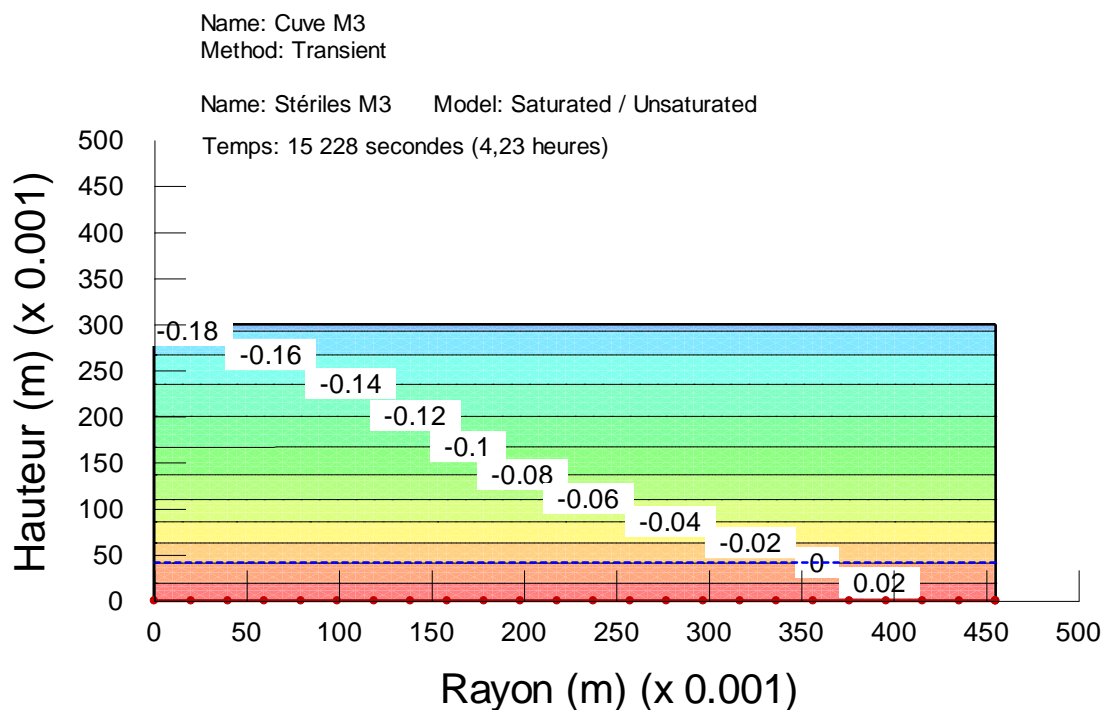


Figure E.52 : M3 en écoulement transitoire – à 15 228 secondes, charge de pression (m H₂O).

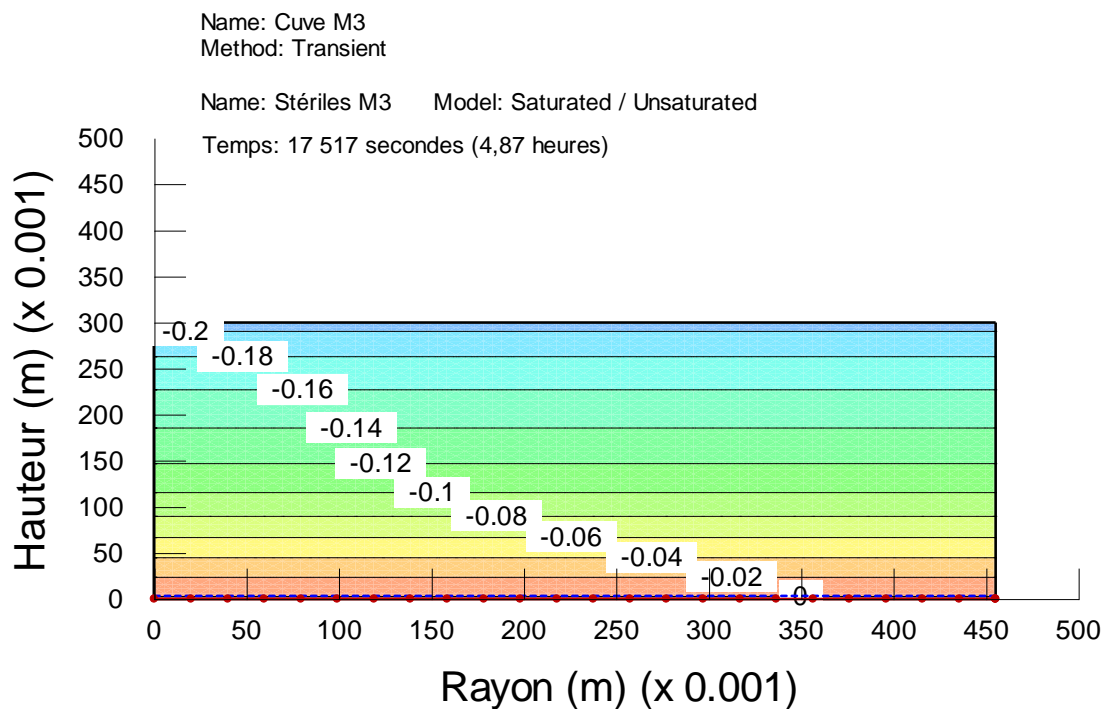


Figure E.53 : M3 en écoulement transitoire – à 17 517 secondes, charge de pression (m H₂O).

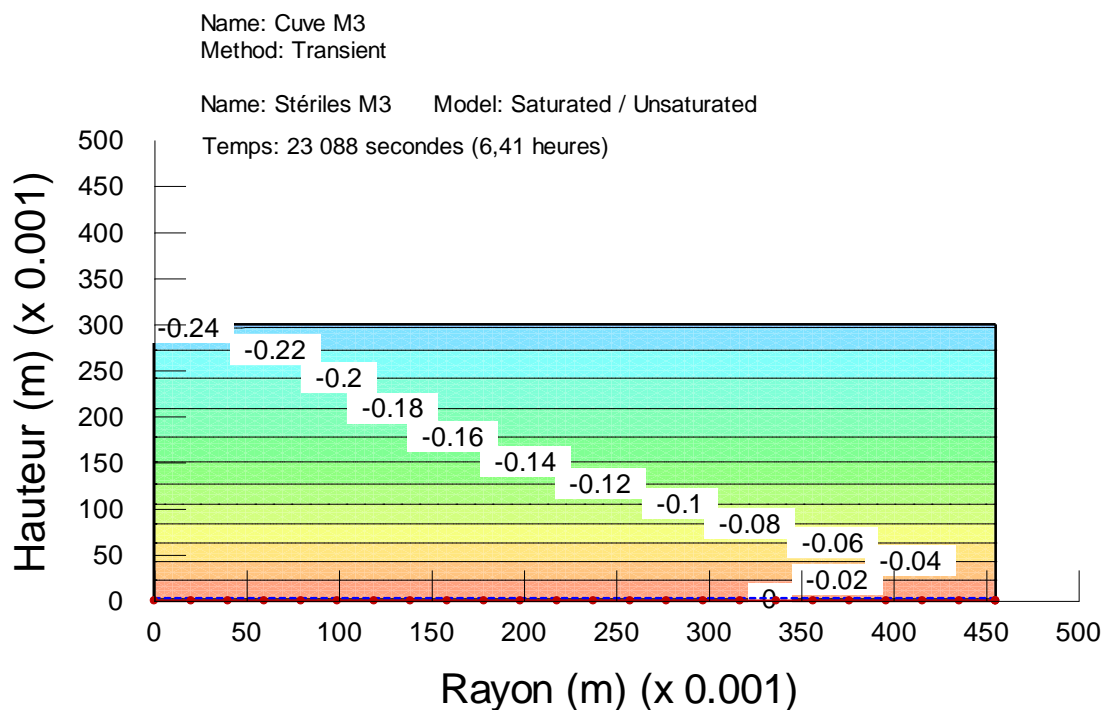


Figure E.54 : M3 en écoulement transitoire – à 23 088 secondes, charge de pression (m H₂O).

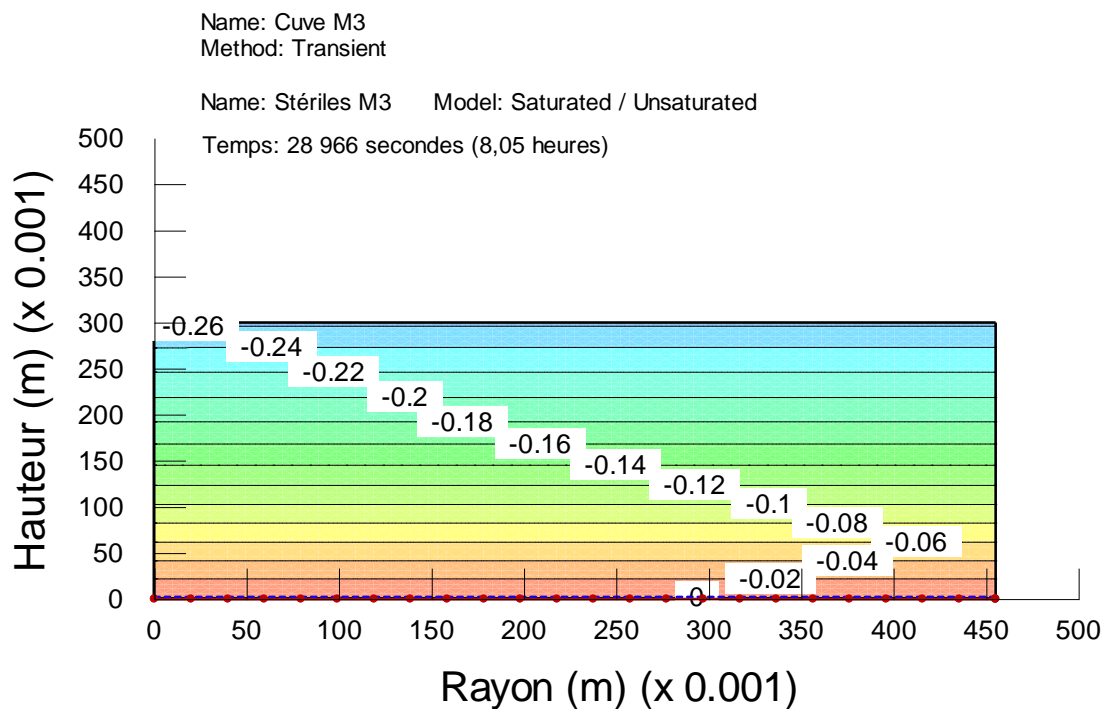


Figure E.55 : M3 en écoulement transitoire – à 28 966 secondes, charge de pression (m H₂O).

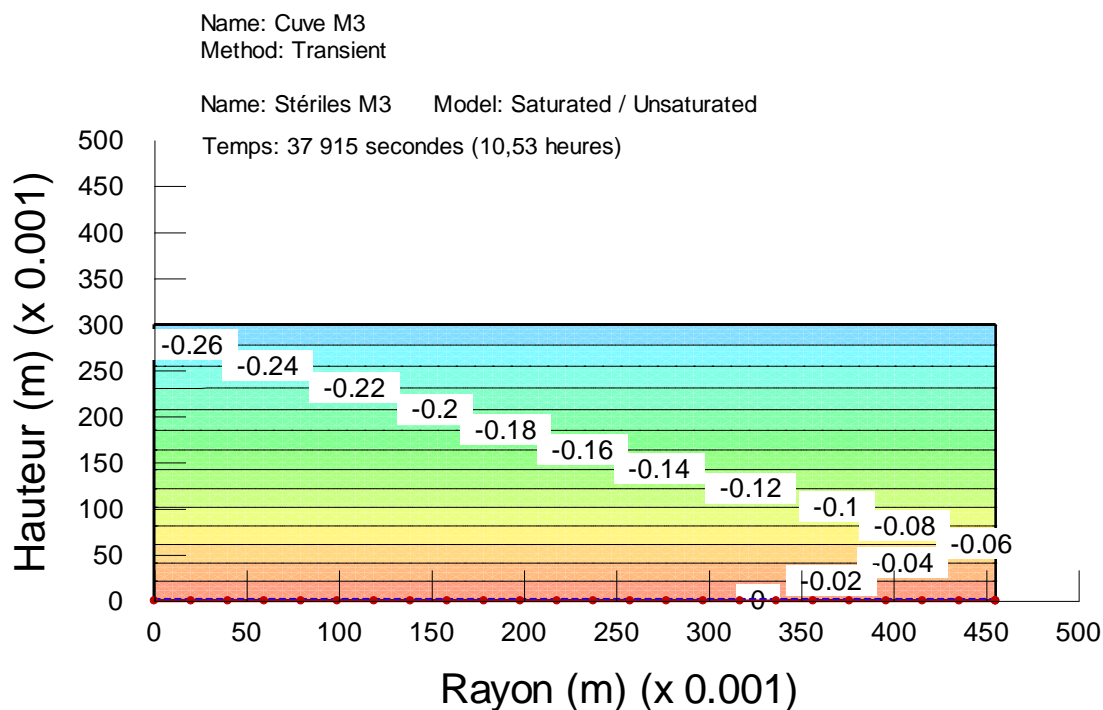


Figure E.56 : M3 en écoulement transitoire – à 37 915 secondes, charge de pression (m H₂O).

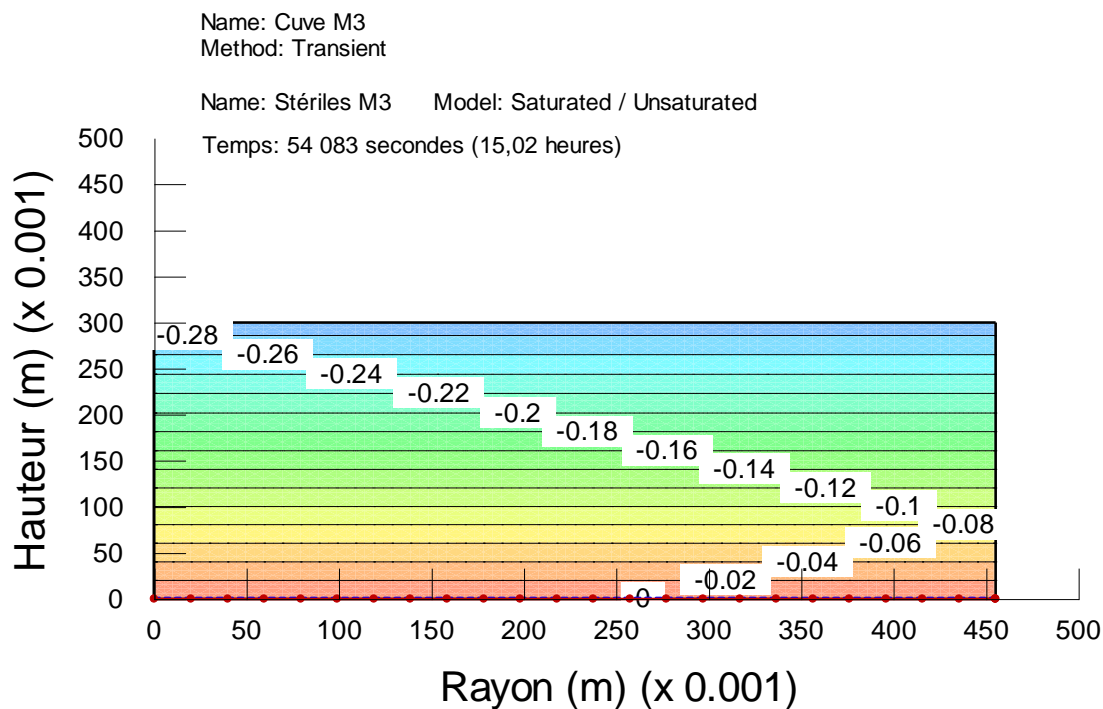


Figure E.57 : M3 en écoulement transitoire – à 54 083 secondes, charge de pression (m H₂O).

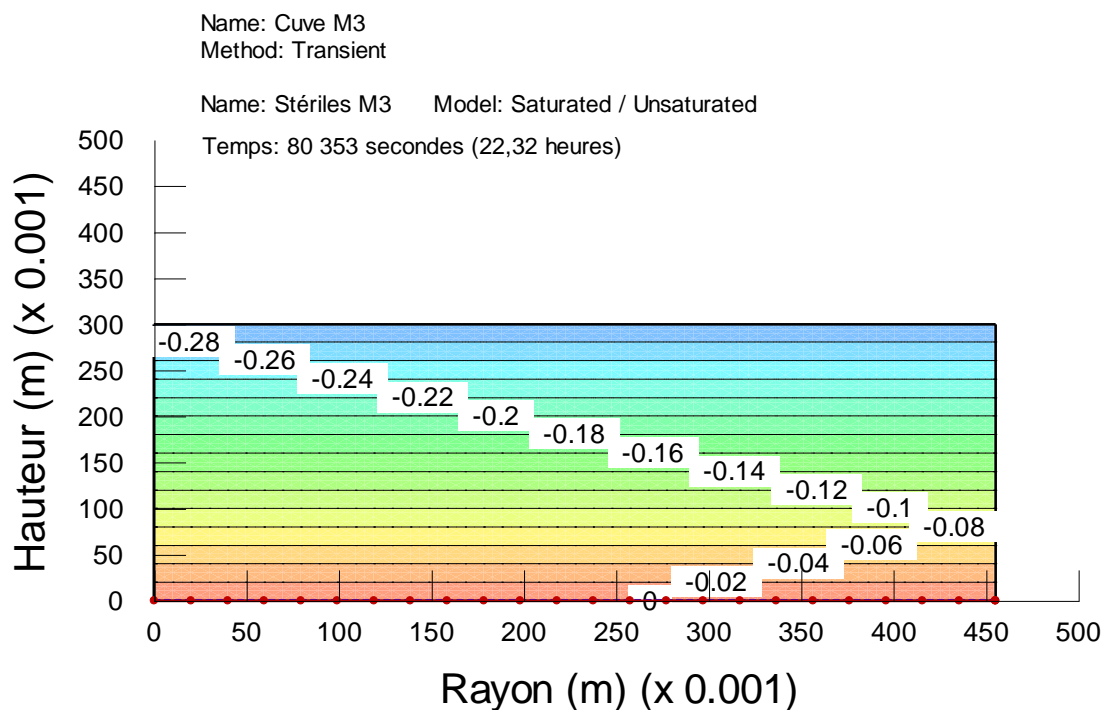


Figure E.58 : M3 en écoulement transitoire – à 80 353 secondes, charge de pression (m H₂O).

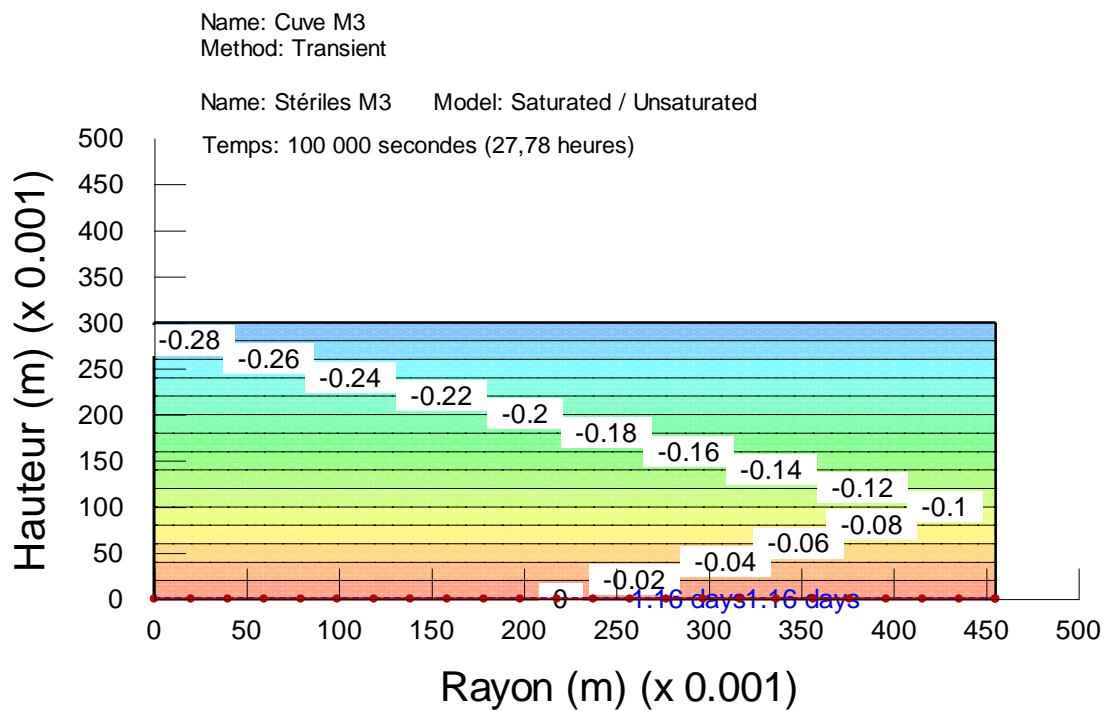


Figure E.59 : M3 en écoulement transitoire – à 100 000 secondes, charge de pression (m H₂O).

ANNEXE F – RÉSULTATS DES MESURES AU DRX SUR LES SÉDIMENTS

F.

Tableau F.1 : Résultats compilés des essais au DRX sur les sédiments récupérés dans l'eau de drainage de la cuve

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4					
	M1E1	M1E2	M1E3	M1E4	DM1-M2	M2E1	M2E2	M2E3	M2E4
Quartz	7,67%	4,51%		5,30%	3,25%	3,42%	4,22%	4,12%	3,92%
Calcite	0,73%	2,92%		22,63%	0,60%	7,80%	3,06%	7,74%	19,62%
Biotite	0,73%	0,60%		0,62%	1,14%	0,00%	0,59%	0,73%	0,58%
Andesine	13,01%	25,45%		16,01%	10,69%	35,62%	31,63%	16,96%	31,92%
Labradorite	43,96%	34,88%		25,71%	53,11%	21,96%	23,95%	34,63%	16,23%
Albite	13,69%	11,82%		7,26%	18,50%	9,94%	11,85%	6,30%	5,35%
Chlorite	12,89%	8,96%		11,88%	3,40%	14,52%	17,38%	11,70%	14,17%
Hematite	0,75%	0,54%		0,27%	1,36%	0,38%	0,69%	0,34%	0,17%
Augite	5,16%	4,92%		3,94%	5,94%	5,09%	5,31%	3,58%	3,77%
Ilmenite	1,42%	1,63%		0,82%	2,02%	1,28%	1,32%	1,35%	0,78%
Bassanite		3,77%		5,57%				6,87%	2,81%
Halite								5,67%	0,69%
Masse (g)	23,19	5,74	0,92	3,29	41,36	103,00	28,80	5,78	6,06

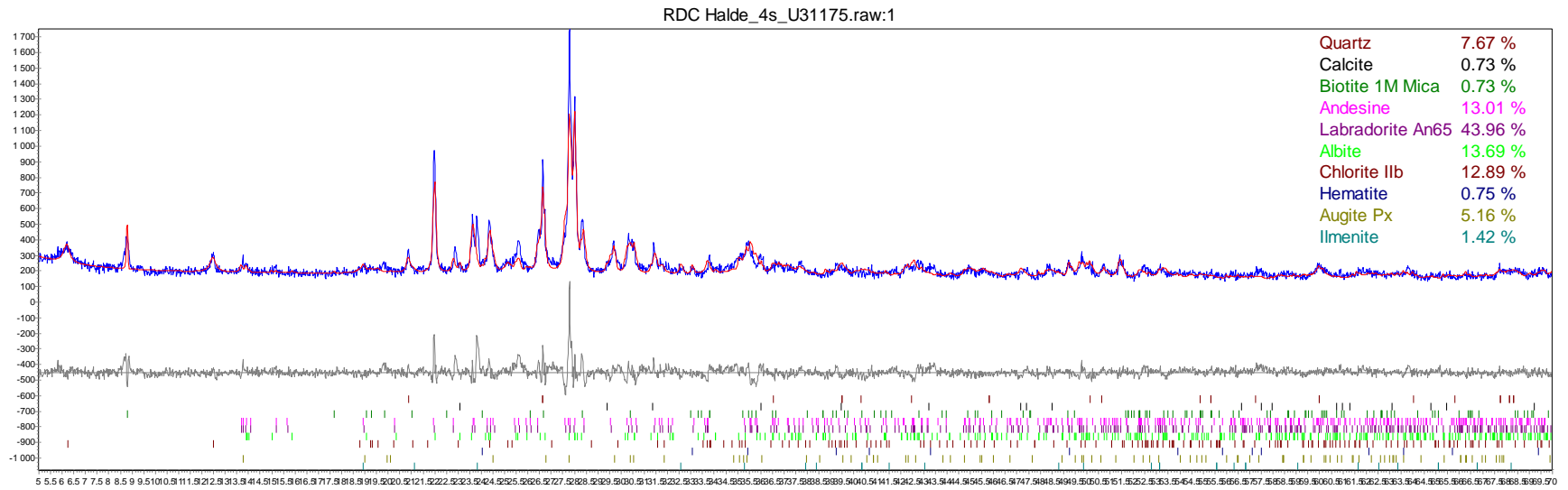


Figure F.1 : U31175 : Montage 1 / Essai 1 / 23.19g Tio-Anorthosite

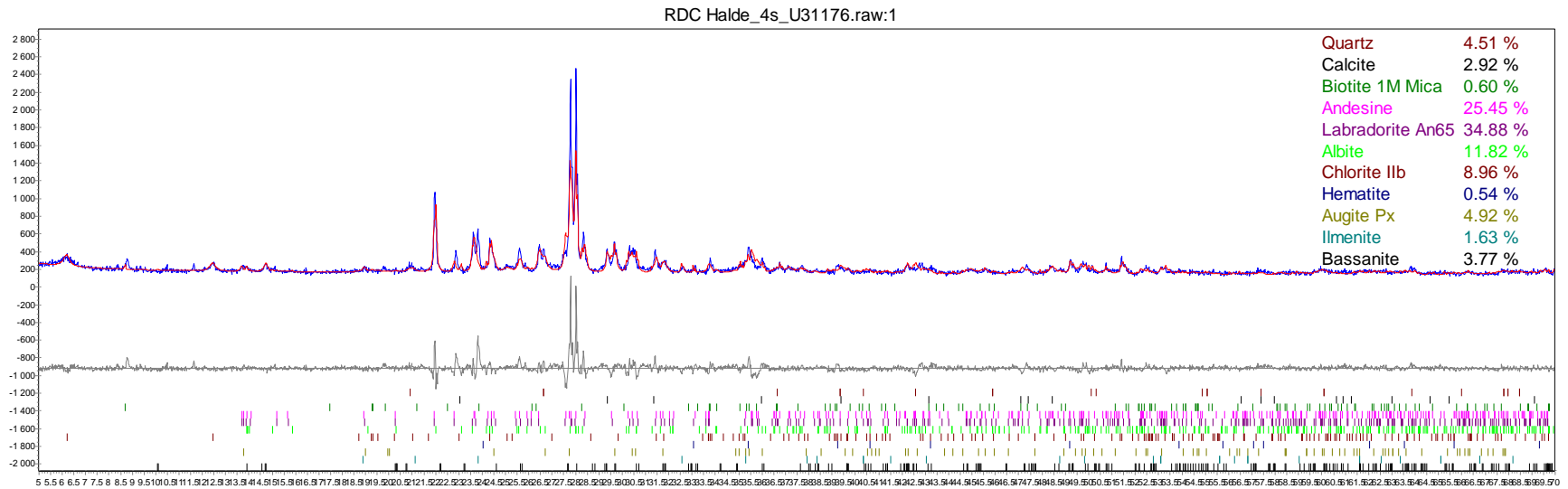


Figure F.2 : U31176 : Montage 1 / Essai 2 / 5.74g Tio-Anorthosite

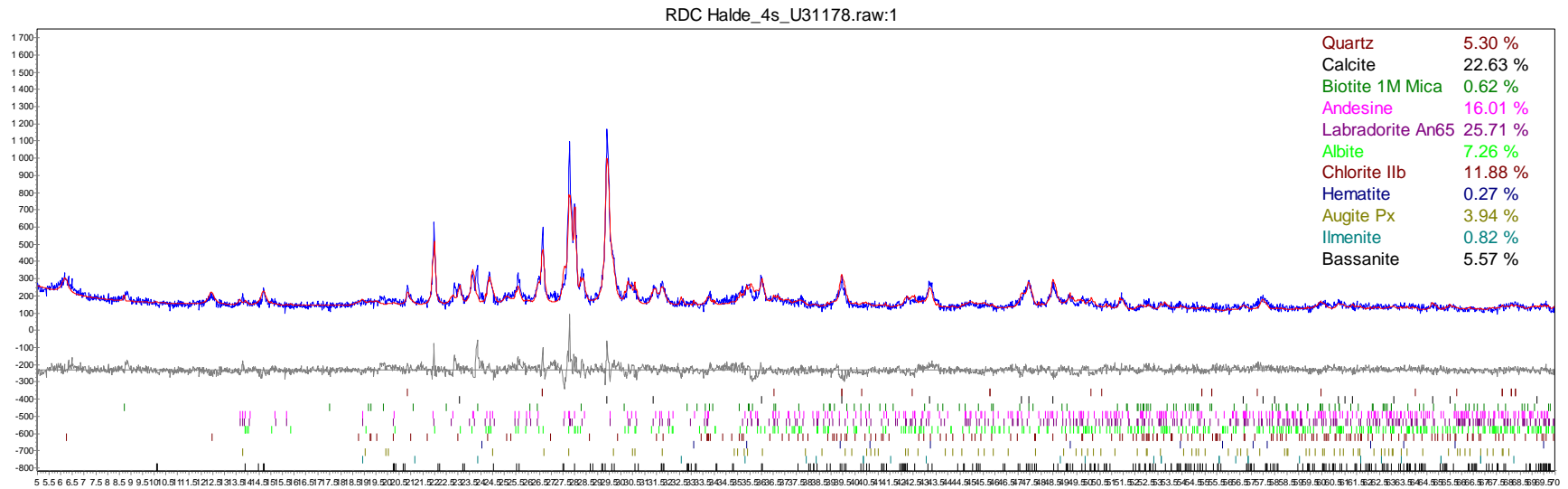


Figure F.3 : U31178 : Montage 1 / Essai 4 / 3.28g Tio-Anorthosite

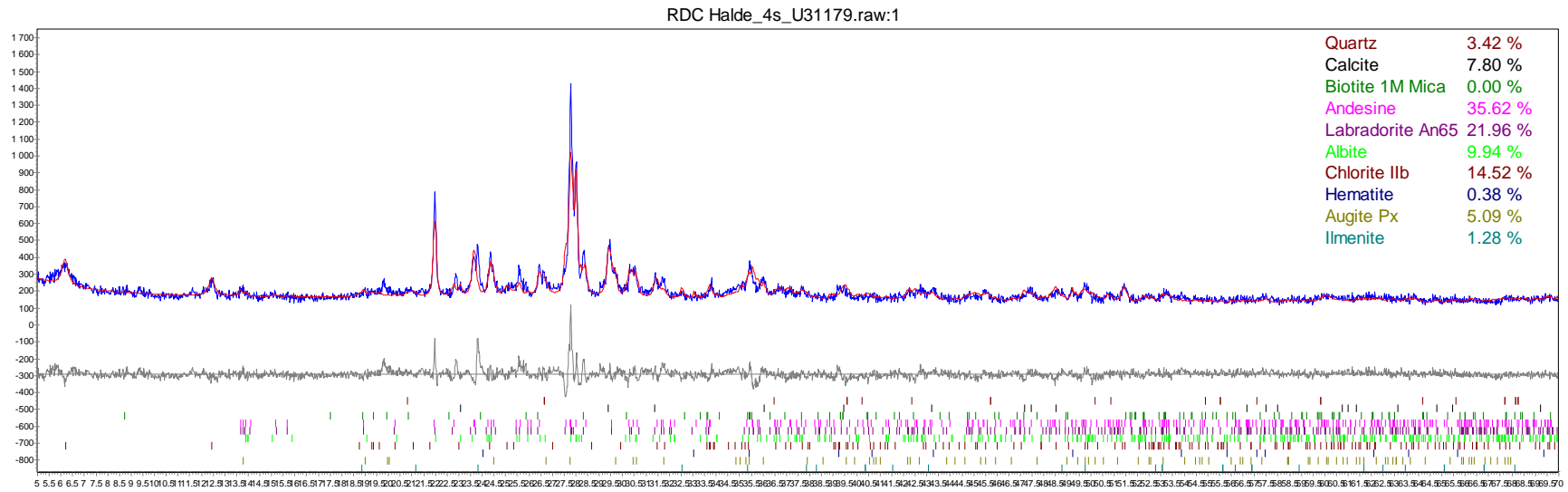


Figure F.4 : U31179 : M2E1 Montage2/Essai1/103g Tio-Anorthosite

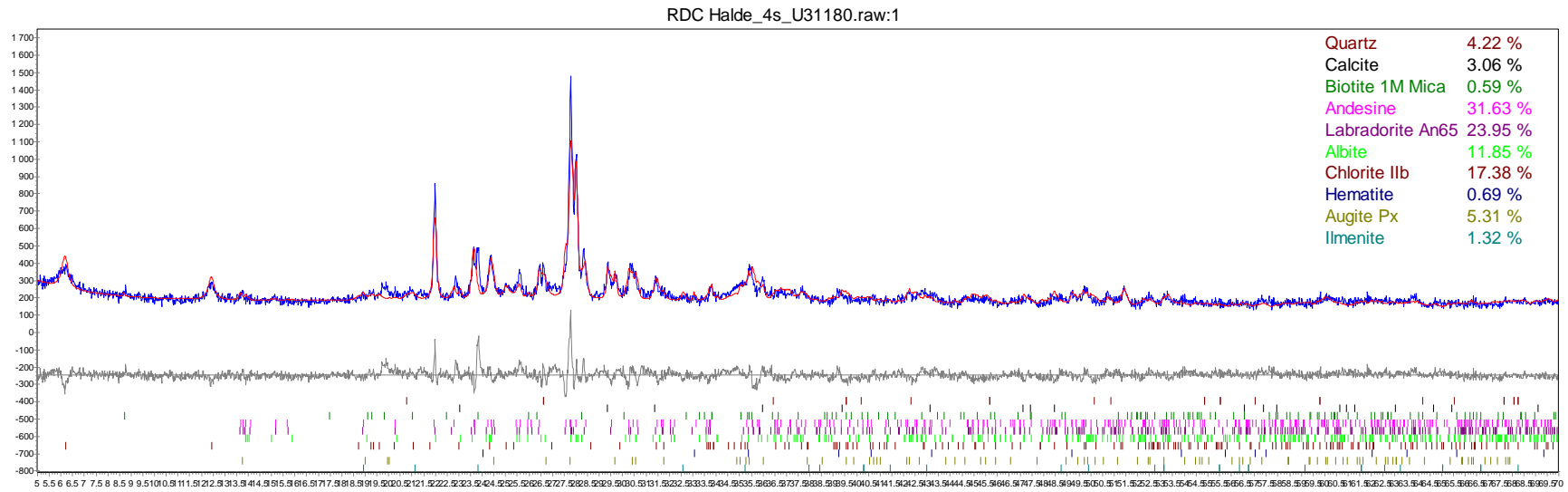


Figure F.5 : U31180 : Montage2/Essaie2/28.8g Tio-Anorthosite

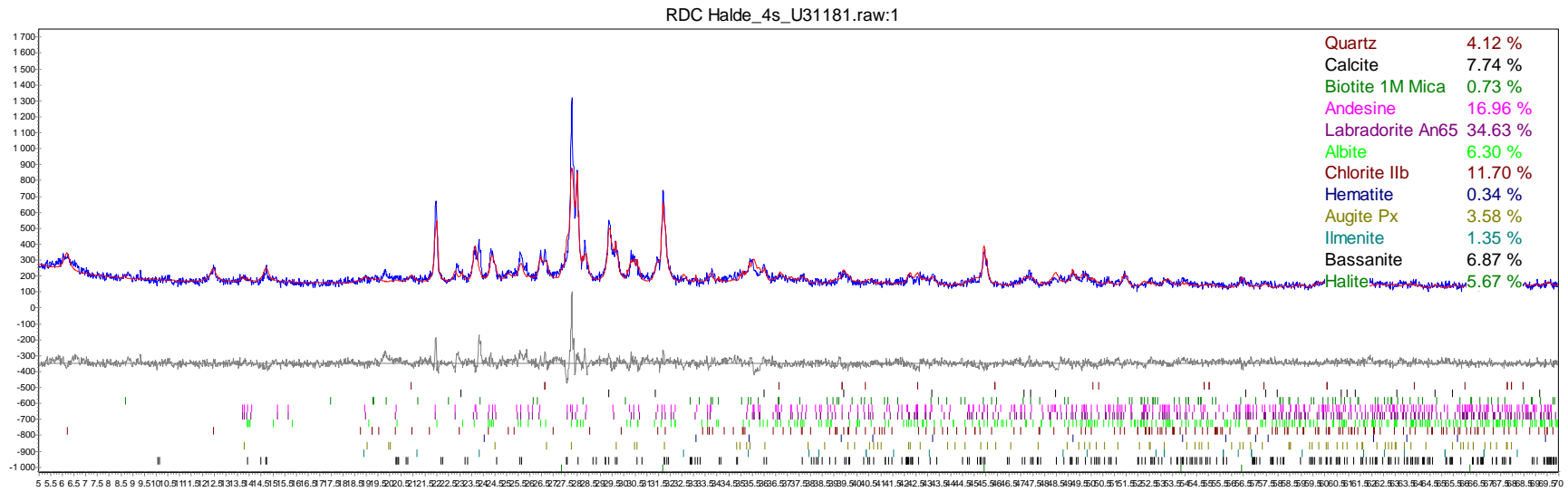


Figure F.6 : U31181 : M2E3 Montage2/Essai3/5.78g Tio-Anorthosite

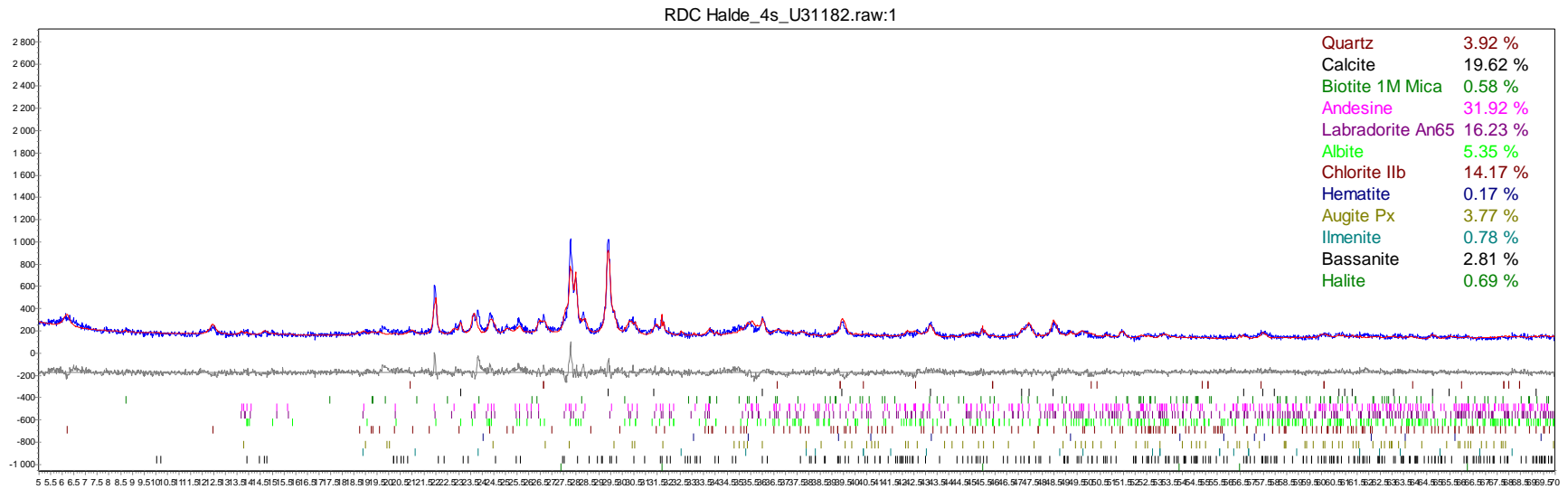


Figure F.7 : U31182 : M2E4 Montage2/Essaie3/6.06g Tio-Anorthosite

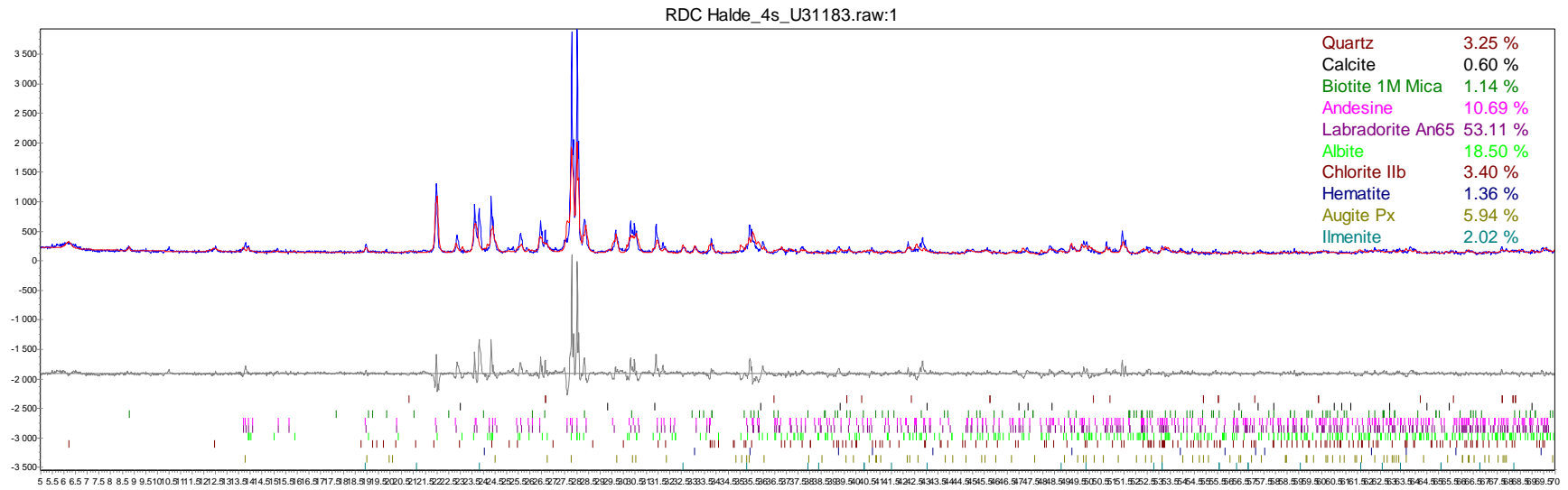


Figure F.8 : U31183 : Montage2/41.36g Tio-Anorthosite

ANNEXE G – RÉSULTATS DÉTAILLÉS DES ESSAIS STANDARDS

G.

Tableau G.1 : Données de l'essai de distribution granulométrique démontage M1

Granulométrie Lac Tio		Démontage M1		
Reprise par Michelle Caron, avril 2014				
Masse d'échantillon/g		1667,7		
Tamis/mm	Masse retenue/g	% Passant		
10	0	100		
2,500	682,1	59,10		
1,250	954,8	42,75		
0,630	1179,1	29,30		
0,315	1364,7	18,17		
0,160	1505,1	9,75		
0,080	1611,2	3,39		
Granulométrie complète après les essais			Granulométrie avant les e	
Retenu par (mm)	% passant		10,00	100
9,525	99,7000		5,00	82
5	77,6800		2,500	64
2,5	60,4700		1,125	47
1,25	45,1900		0,630	34
0,63	32,2500		0,315	23
0,315	20,8300		0,160	15
0,16	12,1900		0,080	9
0,08	6,0800		0,0660	8,8
0,045	2,6000		0,0474	7,4
0,035	2,2000		0,0342	5,5
0,027	1,8000		0,0245	4,4
0,020	1,5000		0,0175	3,3
0,015	1,2000		0,0129	2,8
0,011	0,9000		0,0092	1,9
0,008	0,7000		0,0065	1,4
0,006	0,5000		0,0046	1,1
0,004	0,3000		0,0033	0,6
0,003	0,2000		0,0023	0,4
0,002	0,2000		0,0014	0,0
0,001	0,1000			

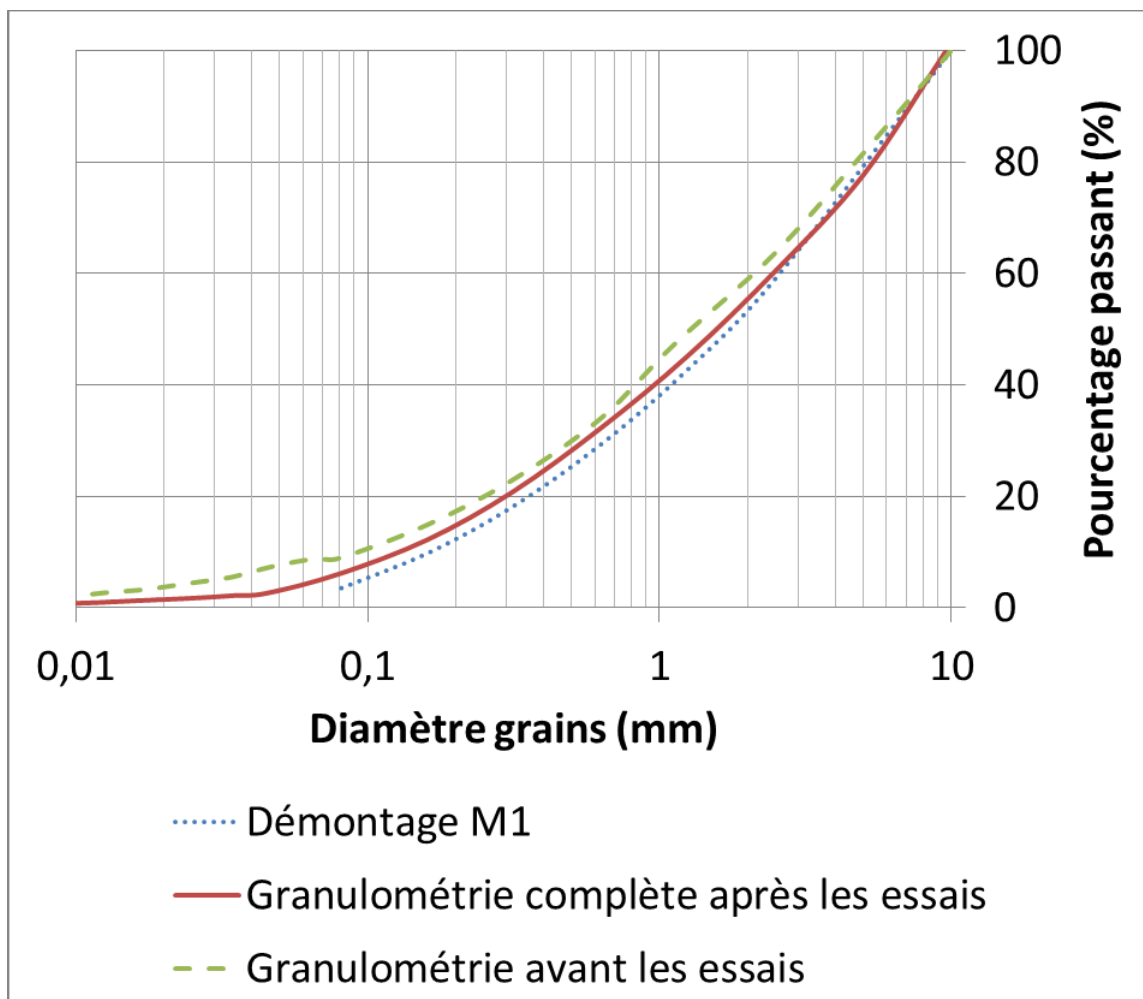


Figure G.1 : Distribution granulométrique au démontage M1

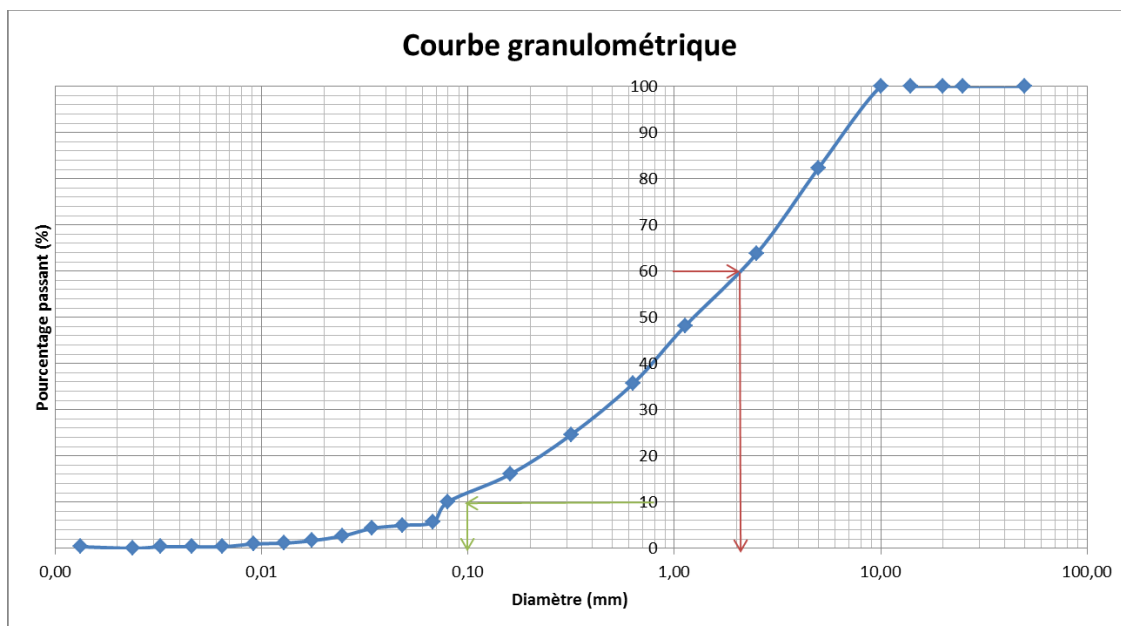


Figure G.2 : Résultat de l'essai de distribution granulométrique démontage M1

Tableau G.3 : Données de l'essai de distribution granulométrique démontage M2

Nom du fichier :		Tamis (mm)	masse retenu (g)	Passant (%)
Teneur en eau	119	masse tare	0	100
Masse sol hum. + tare	480,9	50,00	0	100
Masse sol sec + tare	480,9	25,00	0	100
Masse sol sec	351,4	20,00	0	100
Masse tare	129,5	14,00	0	100
Teneur en eau (%)	0,00	10,00	0	100
Masse utilisée granulo(m tot avant lavage)	351,40	5,00	62	82
Sédimentométrie	4	2,500	127,3	64
Masse sol sec + tare	237,10	1,125	182,3	48
Masse sol hum. + tare	237,1	0,630	226,1	36
Masse tare	151	0,315	265,1	25
Masse sol sec	86,10	0,160	295,1	16
Masse sol humide	86,1	0,080	316	10
Masse sol utilisée sec	86,10	Gs=	2,729	a=
w	#DIV/0!	k=	0,01297	0,98

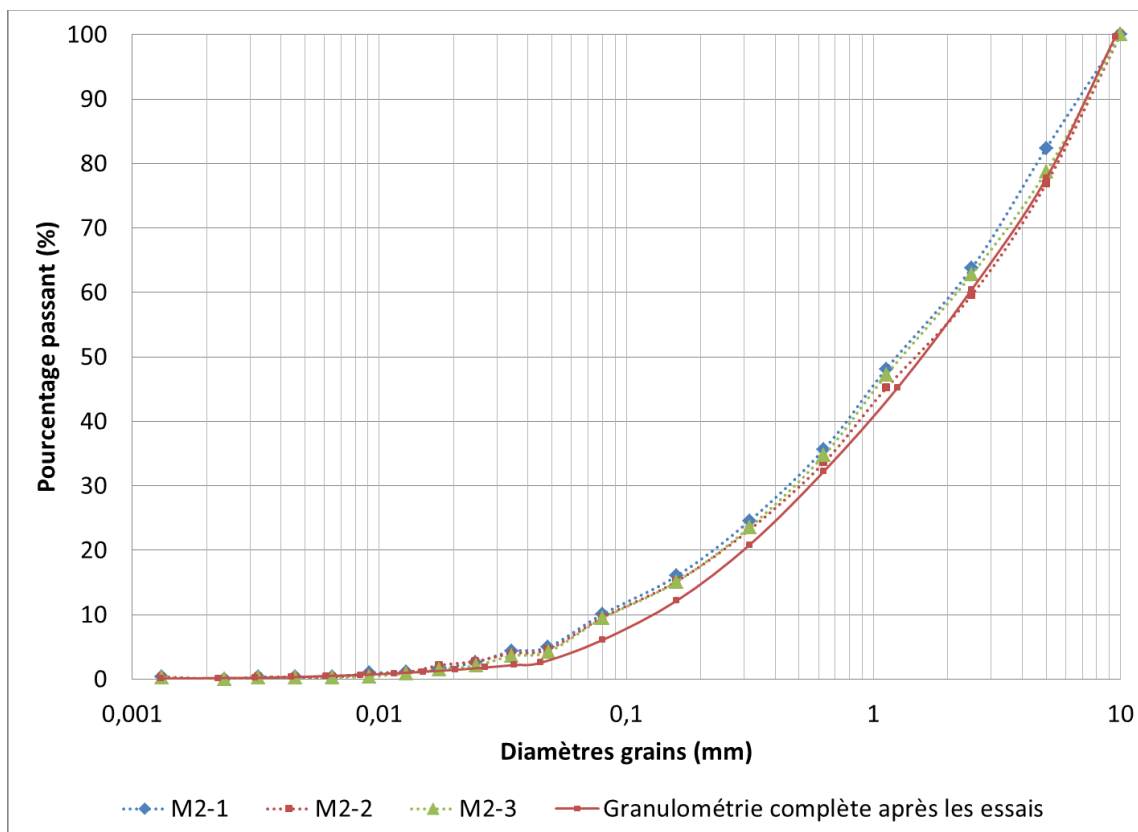


Figure G.3 : Distribution granulométrique au démontage M2.

Tableau G.4 : Données de l'essai de distribution granulométrique échantillon complet

Description du sol:		Anorthosite tamisée 0-10mm, granulométrie complète						
Détails du test								
Tamissage à la main	+ ou - 2,5mm		Diamètre maximale des particules (mm)		10 mm			
Tamissage gros tamis	+2,5mm (tamis 3/8", 4,75mm, 2,5mm)							
Tamissage petit tamis	-2,5mm (tamis 5mm, 2,5mm, 1,25mm, 0,63mm, 0,315mm, 0,160mm, 0,08mm)							
Notes et observations:								
Sol est friable								
Beaucoup de poussières lors du tamissage à sec								
Tout le sol qui était dans la cuve a été passé au tamis. Chaque échantillon de sol retenu par chacun des tamis a été placé dans une chaudière bien identifiée qui avait été pesé à sec au préalable.								
Masse des roches stériles d'anorthosite tamisées - courbe complète								
Retenu par (mm)	Masse chaudière (g)	Masse chaudière + sol (kg)	Masse sol (kg)		Retenu par (mm)	Masse sol (kg)	% passant	% retenu
9,525	0	0,99	0,99		9,525	0,99	99,7%	0,28%
5	1021,5	34,65	33,63		5	78,59	77,7%	22,04%
5	970,8	16,9	15,93		2,5	61,37	60,5%	17,21%
5	1021,2	30,05	29,03		1,25	54,45	45,2%	15,27%
2,5	749	23,3	22,55		0,63	46,15	32,3%	12,94%
2,5	1041,8	27,9	26,86		0,315	40,71	20,8%	11,42%
2,5	985,3	12,95	11,96		0,16	30,83	12,2%	8,65%
1,25	959,5	29,45	28,49		0,08	21,76	6,082%	6,1028%
1,25	893,4	19,15	18,26		-0,08	21,69	6,0825%	6,0825%
1,25	745,4	8,45	7,70		Total	356,53		
0,63	975,4	26,4	25,42					
0,63	928,8	21,65	20,72					
0,315	1021,1	28,45	27,43		0,543573			
0,315	1020,4	14,3	13,28					
0,16	1003,9	27,25	26,25					
0,16	941,7	5,5273	4,59					
0,08	1041,5	22,8	21,76					
-0,08	1014	22,7	21,69					
	total	356,53						
Précision balance en kg de 0,5kg								

Tableau G.5 : Résultats de l'essai de distribution granulométrique échantillon complet

Pourcentage passant (D _%)	Diamètre (mm)		
D ₅	0,06		
D ₁₀	0,14		
D ₃₀	0,55		
D ₅₀	1,6		
D ₆₀	2,5		
Paramètre	Valeur		
C _u	17,86	étalé	
C _c	0,86	Gap-graded	
S _s	17,4 (m ² /kg)		

Tableau G.6 : Résultats essai Proctor standard

Détails du test										
Effort de compaction	Standard - Marteau 2680g		Diamètre maximale des particules (mm)			10 mm				
Temps d'hydratation du sol avant test:			Diamètre du moule:			10,143 cm				
Procédure de compaction	ASTM D698- Méthode B		Volume du moule (Vm) avec eau:			943,2 cm³				
Hauteur du moule:	11,62	cm	Volume du moule (Vm) avec dimensions:			938,8 cm³				
Notes et observations:										
Tests à approx. 4,0%, 4,5%, 5,2%, 5,5%, 6,0%, 6,5%, 7,0% et 7,5% on été mélangé le 30 mars 2015										
Test wet (#9) mélangé avec sol déjà humide restant des autre échantillons préparés avant										
Hauteur de tombée du marteau 1pied										
Sol est friable										
Mesures et calculs										
Date			31-mars-15	31-mars-15	31-mars-15	31-mars-15	31-mars-15	31-mars-15	31-mars-15	31-mars-15
Identification de l'essai			1	2	4	5	6	7	8	9
Masse moule + sol compacté	g		6338,7	6358,4	6395,9	6419,6	6472,4	6468,3	6478,6	6490,3
Masse moule	g		4292,7	4291,3	4291,8	4292,3	4291,8	4291,8	4291,8	4291,6
Masse sol compacté	g		2046	2067,1	2104,1	2127,3	2180,6	2176,5	2186,8	2198,7
Masse volumique humide, ρ _t	g/cm³		2,17	2,19	2,23	2,26	2,31	2,31	2,32	2,33
Masse volumique sèche, ρ _d	g/cm³		2,09	2,10	2,12	2,13	2,17	2,16	2,16	2,16
Poids unitaire humide, γ _t	kN/m³		21,27	21,49	21,88	22,12	22,67	22,63	22,74	22,86
Poids unitaire sec, γ _d	kN/m³		20,46	20,56	20,75	20,87	21,28	21,21	21,15	21,18
Masse volumique eau, ρ _w	g/cm³		0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998
Poids unitaire eau, γ _w	kN/m³		9,78	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78	9,78
Ratio,γ _d / γ _w			2,09	2,10	2,12	2,13	2,18	2,17	2,16	2,17
Nom tare			ALEX	19	A	14	10-P5	NO=2	P6	116
Masse tare + sol humide	g		2203,5	2219,4	2429,3	2294,8	2353,5	2348,2	2382,4	2316,5
Masse tare + sol sec	g		2125,7	2129,5	2321,3	2174,9	2220,2	2212,1	2230,1	2156
Masse eau, M _w	g		77,8	89,9	108	119,9	133,3	136,1	152,3	160,5
Masse tare	g		160,7	152,9	325,8	169,6	175	175,3	198,4	127
Masse sol sec, M _s	g		1965	1976,6	1995,5	2005,3	2045,2	2036,8	2031,7	2029
Teneur en eau massique, w	%		3,96	4,55	5,41	5,98	6,52	6,68	7,50	7,91
Volume eau, V _w	cm³		77,97	90,10	108,24	120,17	133,60	136,40	152,64	160,86
Volume sol, V _s	cm³		718,75	723,00	729,91	733,49	748,09	745,02	743,15	742,16
Volume vides, V _v	cm³		224,45	220,20	213,29	209,71	195,11	198,18	200,05	201,04
Indice des vides, e			0,31	0,30	0,29	0,29	0,26	0,27	0,27	0,27
Teneur en eau volumique, θ	m³/m³		0,08	0,10	0,11	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17
Porosité, n			0,24	0,23	0,23	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21
Volume du moule, V _m	cm³		943,2	943,2	943,2	943,2	943,2	943,2	943,2	943,2
D _r			2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74
Saturation, S	%		35%	41%	51%	57%	68%	69%	76%	80%
Saturation, S	%		35%	41%	51%	58%	69%	69%	77%	82%
Teneur en eau saturée, w _{sat}	%		11,32	11,10	10,65	10,39	9,47	9,63	9,77	9,69
Teneur en eau optimale, w _{80%}	%		9,06	8,88	8,52	8,31	7,58	7,71	7,81	7,75

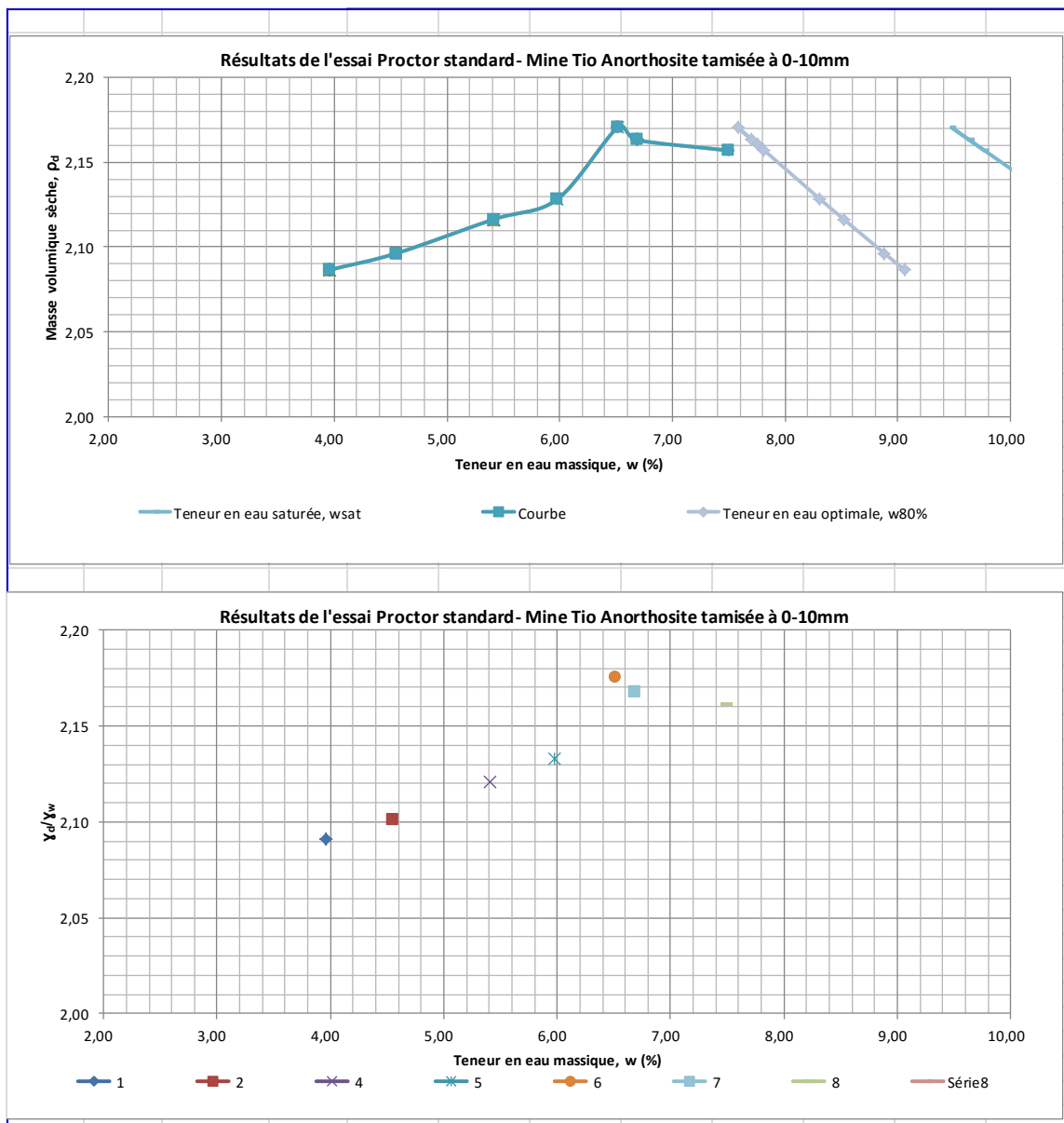


Figure G.4 : Résultats graphiques des essais au Proctor standard

Tableau G.7 : Résultats de l'essai au Proctor modifié

Détails du test									
Effort de compaction	Modifié		Diamètre maximale des particules (mm)			10 mm			
Temps d'hydratation du sol avant test:	28-avr-14		Diamètre du moule:			10,138 cm			
Procédure de compaction	B		Volume du moule (Vm) avec eau:			940,5 cm³			
Hauteur du moule:	11,63	cm	Volume du moule (Vm) avec dimensions:			938,7	cm³		
Notes et observations:									
Tests à approx. 3%, 4%, 5%, 6%, 7% et 8% on été mélangé le 28 avril 2014									
Tests à approx. 8,1% et 8,5% ont été mélangé le 1er mai 2014									
Tests à approx. 8,4% a été mélangé le 4 mai 2014									
Sol est friable									
Mesures et calculs									
Date		29-avr-14	29-avr-14	30-avr-14	30-avr-14	01-mai-14	01-mai-14	12-mai-14	04-mai-14
Masse sol compacté	g	2078,1	2102,7	2136,7	2179,4	2229,9	2238,1	2264,2	2230,1
Masse volumique humide, ρ _t	g/cm³	2,21	2,24	2,27	2,32	2,37	2,38	2,41	2,37
Masse volumique sèche, ρ _d	g/cm³	2,15	2,16	2,17	2,19	2,22	2,23	2,25	2,21
Poids unitaire humide, γ _t	kN/m³	21,67	21,92	22,28	22,72	23,25	23,34	23,61	23,25
Poids unitaire sec, γ _d	kN/m³	21,05	21,13	21,26	21,48	21,78	21,84	22,08	21,71
Masse volumique eau, ρ _w	g/cm³	0,996	0,996	0,996	0,996	0,996	0,996	0,996	0,996
Poids unitaire eau, γ _w	kN/m³	9,77	9,77	9,77	9,77	9,77	9,77	9,77	9,77
Ratio, γ _d / γ _w		2,15	2,16	2,18	2,20	2,23	2,24	2,26	2,22
Teneur en eau massique, w	%	2,94	3,74	4,81	5,82	6,77	6,83	6,91	7,11
Volume eau, V _w	cm³	59,62	76,08	98,27	120,15	141,73	143,54	146,75	148,35
Volume sol, V _s	cm³	738,96	742,11	746,32	754,02	763,87	766,47	774,86	761,75
Volume vides, V _v	cm³	201,55	198,40	194,18	186,49	176,64	174,04	165,65	178,76
Indice des vides, e		0,27	0,27	0,26	0,25	0,23	0,23	0,21	0,23
Teneur en eau volumique, θ	m³/m³	0,06	0,08	0,10	0,13	0,15	0,15	0,16	0,16
Porosité, n		0,21	0,21	0,21	0,20	0,19	0,19	0,18	0,19
Volume du moule, V _m	cm³	940,5	940,5	940,5	940,5	940,5	940,5	940,5	940,5
D _r		2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74
Saturation, S	%	30%	38%	51%	65%	81%	83%	89%	84%
Teneur en eau saturée w _{sat}	%	9,92	9,73	9,46	9,00	8,37	8,23	7,75	8,51
Teneur en eau 80%, w _{80%}	%	7,94	7,79	7,57	7,20	6,70	6,58	6,20	6,80



Tableau G.8 : Résultats de l'essai de densité relative (26 juillet 2013)

Densité relative des grains						
Provenance de l'échantillon:	Échantillon QIT (Fernando) 4 BARILS					
Date:	26-juil-13					
Nom du fichier:	Grains inférieurs à 10mm					
Numéro pycnomètre	3	5	11	14	17	21
Masse pycnomètre + eau + sol (g)			715,88	724,32		720,36
Température (°C)	20	9,2	22,1	22	23,0	22,2
Masse pycnomètre + eau (g)	684,22	683,64	664,56	677,74	655,56	673,27
Numéro tare			t2	19		t3
Masse de la tare + sol sec (g)			237,57	226,27		302,5
Masse de la tare (g)			156,94	152,93		228,2
Masse du sol sec (g)	0	0	80,63	73,34	0,00	74,30
Coefficient de température (K)	1,000	1,00278	0,99954	0,9996	0,99931	0,99951
Masse volumique de l'eau			1,00000	1,0000		1,00000
Masse volumique de l'eau @ 20°C	0,99821	0,99821	0,99821	0,99821	0,99821	0,99821
Densité relative	0,000	0,000	2,751	2,741	0,000	2,731
Densité relative corrigé @ 20°C	0,000	0,000	2,750	2,739	0,000	2,730
Pycnomètre utilisé:	0	0	1	1	0	1
Moyenne (densité relative corrigé):	2,740					
	max:	2,750	min:	2,730	écart:	0,020

Tableau G.9 : Résultats de l'essai de densité relative (6 mars 2014)

Densité relative des grains						
Provenance de l'échantillon:	Lac Tio Démontage 2					
Date:	06-mars-14					
Nom du fichier:	GSLactioDémontagem2					
Numéro pycnomètre	N14	5	11	N15	N16	21
Masse pycnomètre + eau + sol (g)	740,53	0	0	728,02	726,96	0,00
Température (°C)	23,7	0	0	24,2	23,6	0
Masse pycnomètre + eau (g)	677,07	684,50	667,83	671,56	678,22	675,44
Numéro tare	C6			C2	R11	
Masse de la tare + sol sec (g)	816,52			772,67	872,02	
Masse de la tare (g)	717,04			683,65	795,39	
Masse du sol sec (g)	99,48	0	0,00	89,02	76,63	0,00
Coefficient de température (K)	0,999	1,00509	1,00509	0,9990	0,99916	1,00509
Masse volumique de l'eau						
Masse volumique de l'eau @ 20°C	0,99821	0,99821	0,99821	0,99821	0,99821	0,99821
Densité relative	2,762	0,000	0,000	2,734	2,747	0,000
Densité relative corrigé @ 20°C	2,759	0,000	0,000	2,732	2,745	0,000
Pycnomètre utilisé:	1	0	0	1	1	0
Moyenne (densité relative corrigé):	2,745					
	max:	2,759	min:	2,732	écart:	0,027
Gs	2,762			2,734	2,747	
Gs20	2,759			2,732	2,745	
Moyenne	2,747					
Max	2,762					
Min	2,732					
écart	0,012					

Tableau G.10 : Résultats des limites Atterberg (limite liquide)

Détails du test							
Température du four	76		Temps de séchage:	16 h			
Précision de la balance:	0,01g						
Notes et observations							
Mélange le 29 avril 2014							
Limite plastique roulé à la main sur une plaque de plastique, très difficile puisque le sol n'est pas plastique...SILT							
Limite liquide très difficile à effectuer, car tout le sol suit l'outil pour faire le trait au centre.							
Limite liquide: Mesures et calculs							
Date		30-avr-14	30-avr-14	30-avr-14	30-avr-14	30-avr-14	
Identification de l'essai		1	2	3	4	5	
Identification du récipient		25	9	7	21	14	
Tare	g	6,46	6,35	6,38	6,31	6,31	
Tare + sol humide	g	29,41	37,78	36,56	31,49	31,16	
Tare + sol sec	g	25,1	32,07	31,25	27,03	27,19	
Masse d'eau	g	4,31	5,71	5,31	4,46	3,97	
Masse sol sec	g	18,64	25,72	24,87	20,72	20,88	
Teneur en eau massique, w	%	23,12	22,20	21,35	21,53	19,01	
Nombre de coups tombés		6	7	11	18	38	
Limite liquide, LL (méthode B)		19,46	19,03	19,33	20,69	20,00	
Régression linéaire: w à 25 coups		20,45	%				
Coefficient de détermination, R ²		0,90					

Courbe LL

$y = -0,1101x + 23,205$
 $R^2 = 0,9041$

Teneur en eau massique, w (%)

Nombre de coups

◆ Courbe LL — Linéaire (Courbe LL)

Tableau G.11 : Résultats des limites Atterberg (limite plastique)

Limite plastique: Mesures et calculs			
Date		30-avr-14	30-avr-14
Identification de l'essai		1	2
Identification du récipient		11	N
Tare	g	6,42	5,77
Tare + sol humide	g	11,71	10,09
Tare + sol sec	g	10,87	9,41
Masse d'eau	g	0,84	0,68
Masse sol sec	g	4,45	3,64
Teneur en eau massique, w	%	18,88	18,68
Nombre de coups tombés			
Limite plastique PL		18,78	
Limite de liquidité, LL (%)		20,45	
Limite de plasticité, PL (%)		18,78	
Index de plasticité, PI		1,67	
Index de liquidité, LI		0,06	
Classification sur la charte de plasticité		ML	★

For classification of fine-grained soils and fine-grained fraction of coarse-grained soils.

Equation of "A"-line
Horizontal at $PI=4$ to $LL=25.5$,
then $PI=0.73 (LL-20)$

Equation of "U"-line
Vertical at $LL=16$ to $PI=7$,
then $PI=0.9 (LL-8)$

CL or OL

CH or OH

ML or OL

MH or OH

PLASTICITY INDEX (PI)

LIQUID LIMIT (LL)

FIG. 4 Plasticity Chart

ANNEXE H – RÉSULTATS DES CALCULS DE LA RONDETÉ ET DE LA SPHÉRICITÉ

H.

Tableau H.1 : Résumé de la compilation des grains de roches stériles tamisés pour le calcul du facteur de rondeté

Cu 17,86

RF 0,31

Calcul selon Chapuis 2012			
1/e_{max}	2,11	e_{max}	0,47
1/e_{min}	4,27	e_{min}	0,23

Fig. 4-10. Chart for visual estimation of roundness and sphericity of sand grains. Compare this with the excellent half-tone in Powers (1953, p. 118).

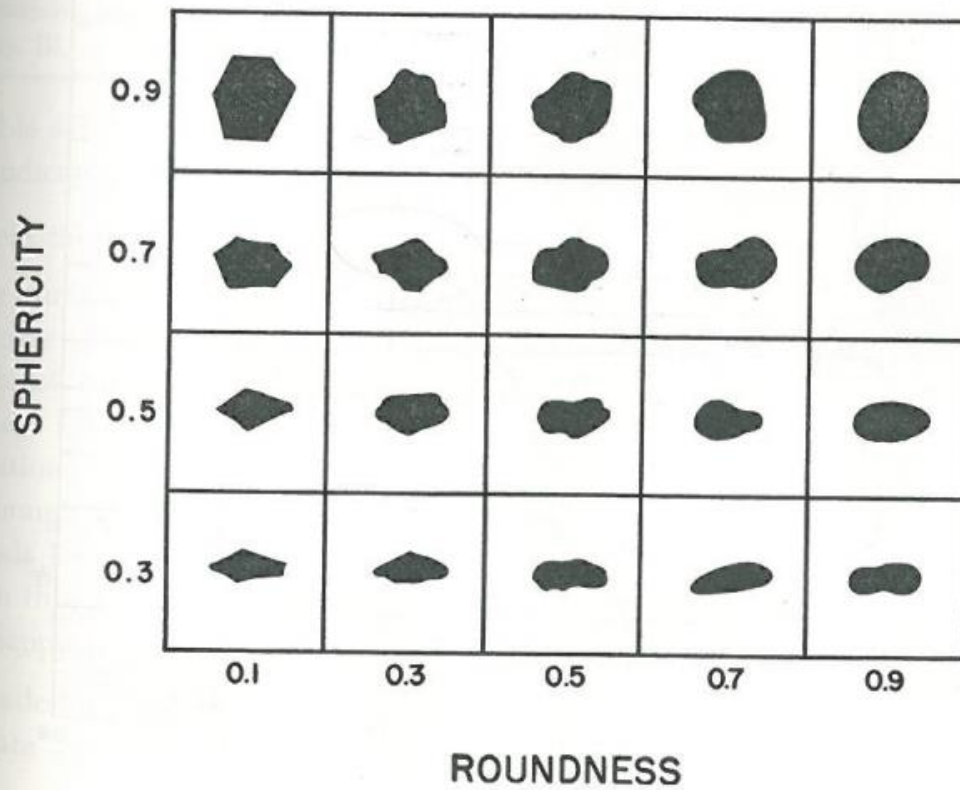


Figure H.1 : Charte de la rondeté et de la sphéricité

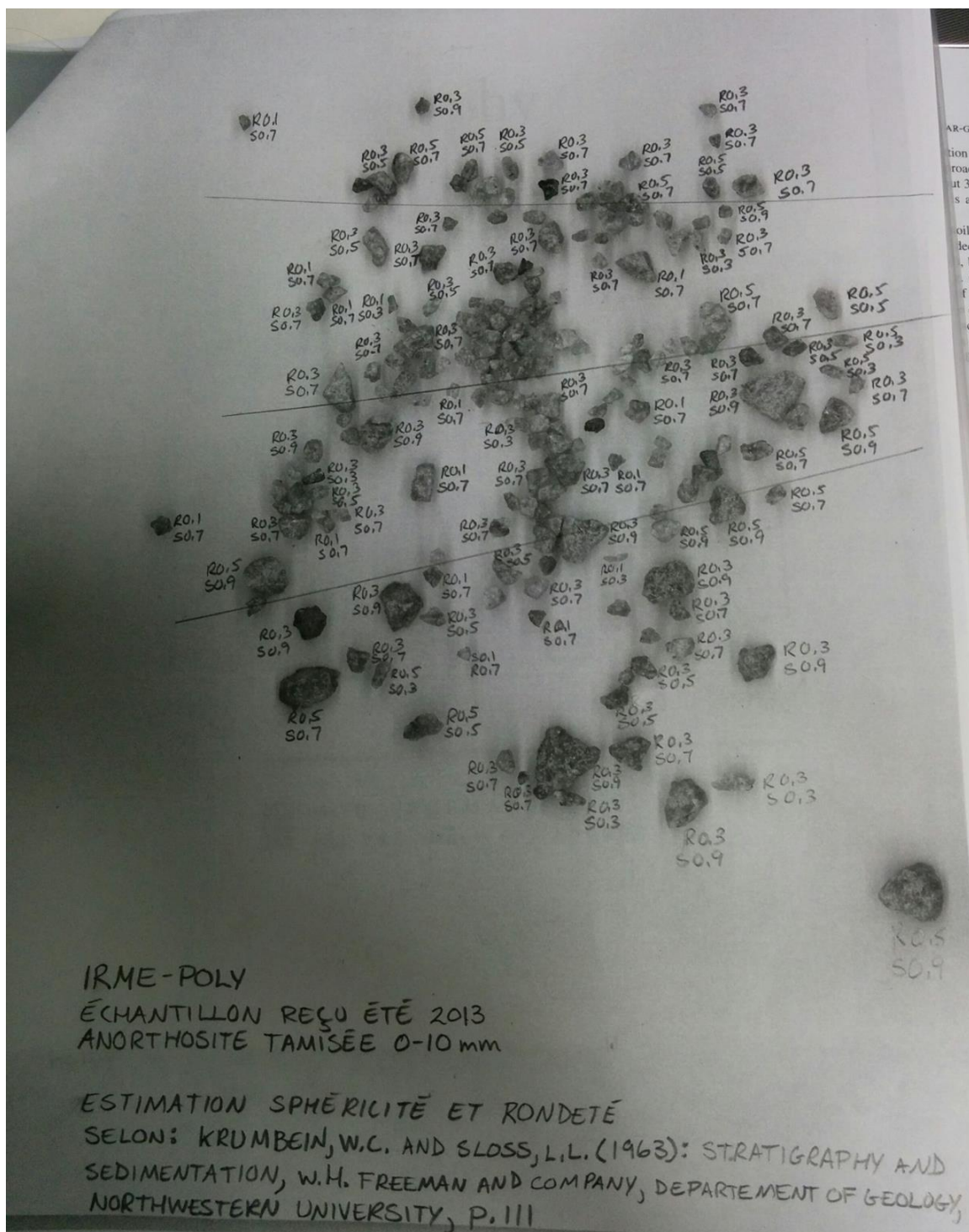


Figure H.2 : Dénombrement des roches pour le calcul de la sphéricité et de la rondeté.
 Krumblein, W.C., Sloss, L.L. (1963): Stratigraphy and Sedimentation - Second edition,
 department of geology, Northwestern University, p.111

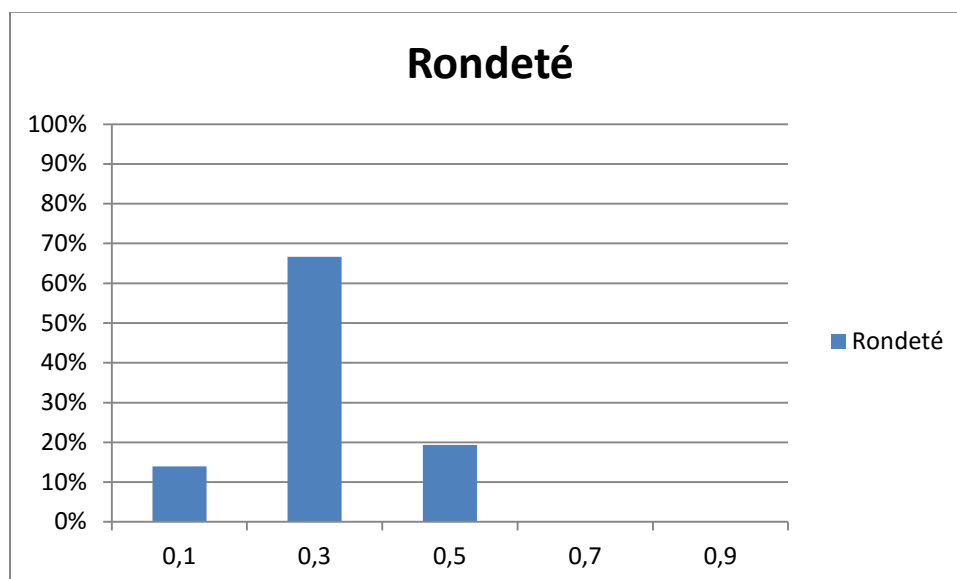


Figure H.3 : Compilation de la rondeté

ANNEXE I – RÉSULTATS DES ESSAIS EN PETITES COLONNES

I.

Tableau I.1 : Données de montage TEVR #1

Démontage cellule TEV résiduelle									
Mine Lac Tio Anorthosite tamisée à 0-10mm (échantillon été 2013)									
Cellule #	1 (Jérôme)								
Test #	1								
Date:	09-sept-14								
Participants:	I. Lévesque								
temps début de la couche	poids/hauteur apres que la couche soit enlevée								
Temps (hh:mm:ss)	Niveau/couche	Poids cellule (g)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	H5 (mm)	Moyenne (mm)	Épaisseur couche (mm)
00:00:00	Intact	15699							
00:02:00	Plaque perforée	13840,2	34,2	30,49	33,67	31,79	33,51	32,73	
00:06:00	Géotextile	13593,4	44,32	47,12	48,23	47,13	47,70	46,90	
00:09:30	couche 1	13559,8	49,51	46,06	47,81	46,19	49,38	47,79	59,05
00:17:00	couche 2	11172,10	112,79	110,22	106,64	100,85	103,72	106,84	60,18
00:23:00	couche 3	8818,7	178,79	163,08	169,58	163,97	159,68	167,02	38,76
00:26:00	couche 4	7182,5	214,97	203,06	205,11	199,3	206,48	205,78	45,44
00:31:00	geotextile	5452,1		1,64	epaisseur			1,64	
00:32:00	sans geotextile	5407,7	250,55	249,95	248,15	249,19	250,08	249,58	
	Plaque perforée								
	montage complet sans sol	7511,5							
	balance précision	0,1							

Tableau I.2 : Données de montage TEVR #1 (suite)

Niveau/couche	Masse tare (g)	Masse tare + sol (g)	Masse tare+sol sec (g)
Géotextile	93,1	126,5	118
couche 1	199,1	2585,2	2446,9
couche 2	152,8	2504,7	2 358,50
couche 3	175,1	1810,9	1 683,50
couche 4	131,5	1860,1	1 710,50
geotextile	105,6	150	129,30

Tableau I.3 : Données de montage TEVR #2

Démontage cellule TEV résiduelle									
Mine Lac Tio Anorthosite tamisée à 0-10mm (échantillon été 2013)									
Cellule #	2 (Stéphanie)								
Test #	1								
Date:	03-nov-14								
Participants:	I. Lévesque								
temps début de la couche	poids/hauteur apres que la couche soit enlevée								
Temps (hh:mm:ss)	Niveau/couche	Poids cellule (g)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	H5 (mm)	Moyenne (mm)	Épaisseur couche (mm)
	Intact, sans quick	15088						0,00	
	Surface sol	13106	47,99	46,41	43,352	45,1	39,46	44,46	44,46
	Couche 1	11752	92,65	74,52	77,53	78,12	84,61	81,49	37,02
	Couche 2	10152	128,98	122,29	120,56	124,84	126,21	124,58	43,09
	Couche 3	8944,00	157,57	157,62	152,8	158,43	154,07	156,10	31,52
	Couche 4	7898	188,47	190,16	178,51	183,27	186,39	185,36	29,26
	Couche 5	6974	211,05	209,34	206,82	208,54	204,57	208,06	22,70
	Couche 6	5368							
	sans geotextile	5360							
	Plaque perforée		253,16	250,28	250,18	250,01	249,69	250,66	42,60
	montage complet sans sol	7340							
	balance précision	2							
	Ressorts (3)	11,3							
	Couvert blanc	1779,1							
	Plaque perforée et géotextile du dessus	89,4						206,20	

Tableau I.4 : Données de montage TEVR #2 (suite)

Niveau/couche	Masse tare (g)	Masse tare + sol (g)	Masse tare+sol sec (g)
Couche 1	181,4	1534	1522,7
Couche 2	132,7	1728,1	1712,5
Couche 3	105,3	1309,9	1 297,10
Couche 4	121,1	1164,2	1 152,80
Couche 5	92,8	1016,3	1 005,60
Couche 6	125,2	1727,3	1 709,50
sans geotextile	127,1	135	134,70

Tableau I.5 : Données de montage TEVR #11

Démontage colonne CRE-TEVR (demi colonne)									
Mine Lac Tio Anorthosite tamisée à 0-10mm (échantillon été 2013)									
Colonnes #	11								
Test #	CRE-TEVR11								
Date:	18-nov-14								
Participants:	I. Lévesque, F. Medina								
temps début de la couche	poids/hauteur apres que la couche soit enlevée								
Temps (hh:mm:ss)	Niveau/couche	Poids colonne (kg)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	H5 (mm)	Profondeur centre couche (mm)	Épaisseur couche (mm)
00:00:00	Intact	37,974						0,00	
	Plaque perforée	35,852	58,65	57,95	57			57,87	57,87
	Géotextile	35,774	65,92	62,62	65,92	65,01	68,32	61,71	7,69
	Surface sol	35,732	69,46	69,08	71,51	69,08	71,76	67,87	4,62
	couche 1	34,806	100	99,157	102,12	97,88	99,80	84,98	29,61
	couche 2	33,584	137,31	138,7	130,84	136,44	131,44	117,37	35,15
	couche 3	32,36	168,08	168,38	164,94	170,12	166,48	151,27	32,65
	couche 4	30,98	210,32	205,43	208,32	206,37	211,50	187,99	40,79
	couche 5	29,686	252,27	248,29	241,75	246,03	251,03	228,13	39,49
	couche 6	28,428	276	276	269	271	278,00	260,94	26,13
	couche 7	27,28	312	311	303	297	312,00	290,50	33,00
	couche 8	25,936	346	348	335	339	344,00	324,70	35,40
	couche 9	24,728	380	378	378	372	377,00	359,70	34,60
	couche 10	23,32	421	415	415	415	422,00	397,30	40,60

Tableau I.6 : Données de montage TEVR #11 (suite)

Temps (hh:mm:ss)	Niveau/couche	Poids colonne (kg)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	H5 (mm)	Profondeur centre couche (mm)	Épaisseur couche (mm)
	couche 11	21,636	464	467	459	465	465,00	440,80	46,40
	couche 12	20,074	513	510	502	508	514,00	486,70	45,40
	couche 13	18,592	554	543	549	552	547,00	529,20	39,60
	couche 14-sans geot	16,2871	614	612	609	612	611,00	580,30	62,60
	Geotextile	16,256							
	montage complet sans sol	18,46							
	balance vide								
	Hauteur de la colonne du sol jusqu'à la surface	67,7 cm							
	Succion appliquée au quick au bas de la colonne							204,00 cm	
	Du sol jusqu'au quick du bas							3,00 cm	
	Hauteur total du sol jusqu'au dessus du plexiglass							68,90 cm	
	Hauteur de la colonne du sol jusqu'à la surface grise au haut de la colonne (sans plex)							67,70 cm	
	Succion appliquée à la surface du sol							264,91 cm	

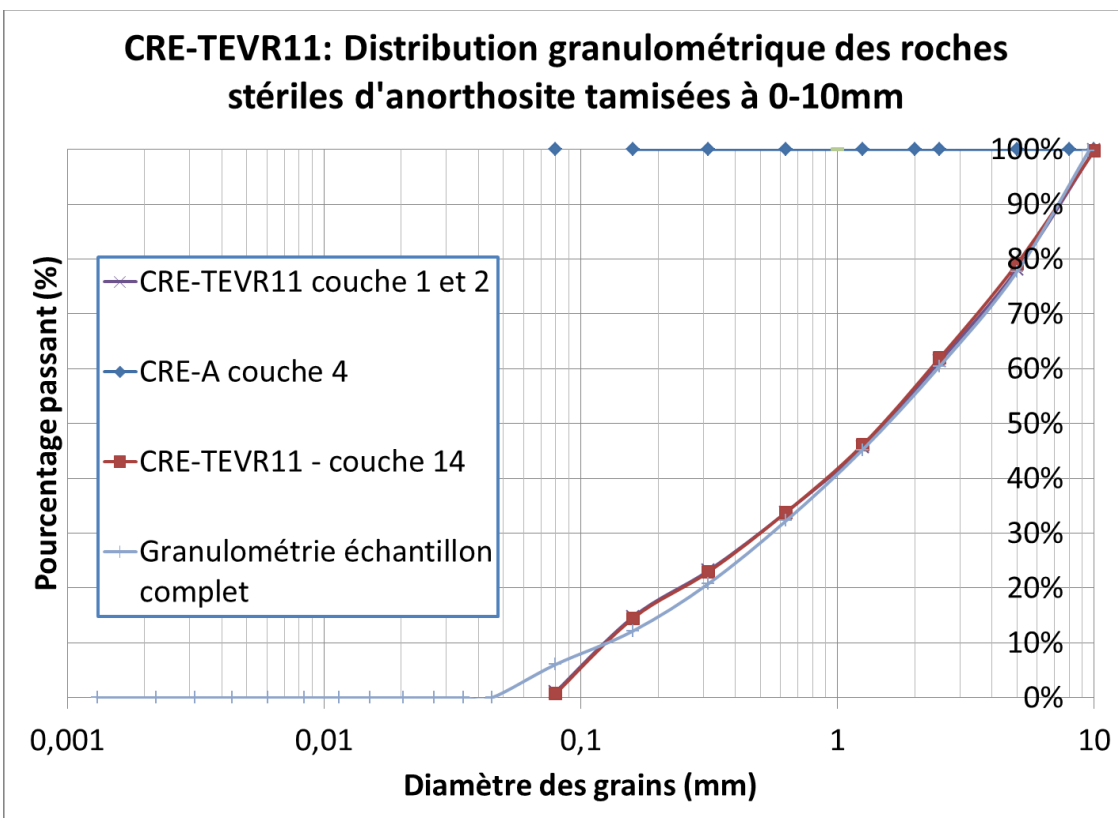


Figure I.1 : Distribution granulométrique de l'essai TEVR11

Tableau I.7 : Données de montage TEVR #5

Démontage colonne CRE-TEVR (demi colonne)									
Mine Lac Tio Anorthosite tamisée à 0-10mm (échantillon été 2013)									
Colonnes #	5								
Test #	CRE-TEVR5								
Date:	26-nov-14								
Participants:	I. Lévesque								
temps début de la couche	poids/hauteur apres que la couche soit enlevée								
Temps (hh:mm:ss)	Niveau/couche	Poids colonne (kg)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	H5 (mm)	Profondeur centre couche (mm)	Épaisseur couche (mm)
00:00:00	Intact	38,38						0,00	
épaisseur 6,57mm	Plaque perforée	36,286	53,23	48,86	54,85	52,22	54,87	52,81	52,81
00:02:26	Géotextile	36,2	65,56	32,63	66,32	64,16	64,16	55,69	5,76
00:04:54	Surface sol	36,176	66,83	62,25	68,64	66,56	66,36	62,35	7,56
00:09:58	couche 1	34,696	109,32	107,67	110,3	113,2	110,94	88,21	44,16
00:13:53	couche 2	33,186	152,04	148,58	151,11	156,35	152,79	131,23	41,89
00:19:06	couche 3	31,568	199,19	194,71	194,71	191,73	195,86	173,71	43,07
00:22:04	couche 4	30,154	239,8	238,62	238,04	232,8	244,44	216,99	43,50
00:26:00	couche 5	28,422	285	274	273	280	275,00	258,07	38,66
00:29:19	couche 6	26,792	329	321	317	331	324,00	300,90	47,00
00:32:30	couche 7	25,274	367	362	366	365	362,00	344,40	40,00
00:35:54	couche 8	23,776	407	402	409	408	400,00	384,80	40,80
00:40:00	couche 9	22,23	458	440	451	457	442,00	427,40	44,40
00:43:05	couche 10	20,762	495	486	495	492	490,00	470,60	42,00

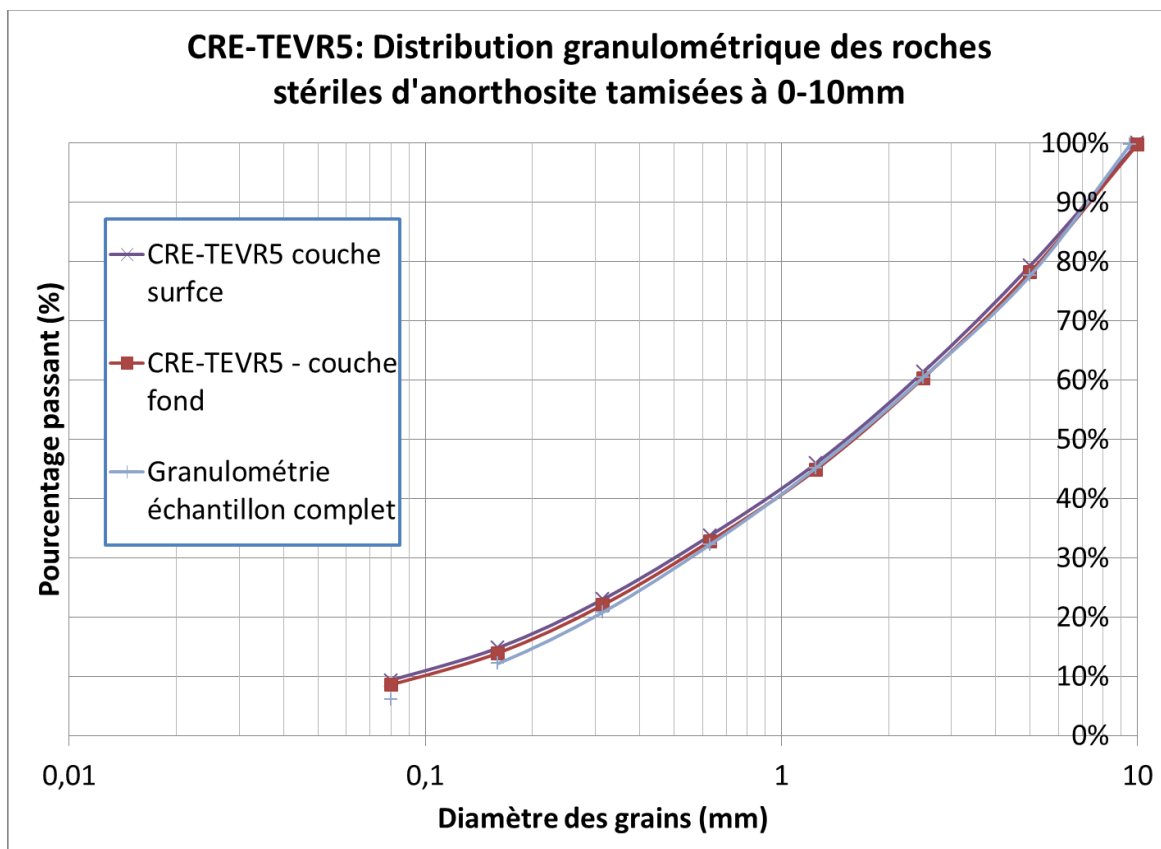


Figure I.2 : Distribution granulométrique pour l'essai TEVR5

ANNEXE J – RÉSULTATS DES ESSAIS DE PERMÉABILITÉ

J.

Tableau J.1 : Montage de l'essai de perméabilité à charge variable (8 août 2013)

Conductivité hydraulique à charge variable des roches stériles				
Mine Tio - 0-10mm tamisé				
Échantillon reçu été 2013				
Information générale				
Testé par:		Étudiants stagiaires été 2013		
Laboratoire IRME				
Date testé:		08-août-13		
Projet:		Caractérisation à la réception des barils		
Détails du test				
Diamètre max. particules		10 mm		
Diamètre du moule, D		10,035 cm		
Masse cellule vide et connections, M ₁		3072,6 g		
Masse cellule eau désaéré et connections, M _e		4198,1 g		
Masse cellule sol, air, connections, M ₂		5008,3 g		
Masse cellule sol, eau, air, connections, M _{tot}		5351 g		
Masse sèche du sol, M _s		1 935,70 g		Calculé
Masse sol humide, M _{ms}		2 338,23 g		
Masse eau, M _{win}		479,26 g		Inconnu
Masse eau, M _{wf}		479,26 g		Inconnu
Teneur en eau massique initiale, w _{in}		24,8 %		
Teneur en eau massique finale, w _f		24,8 %		
Densité relative du sol, G _s		2,745		
Indice des vides, e		0,681		
Porosité initial, n		0,405		
Volume des vides, V _v		481,7 cm ³		
Volume des pores, V _p		481,7 cm ³		
Volume eau, V _w		480,8 cm ³		
Degré de saturation		99,8 %		
Aire de l'échantillon, A		79,09 cm ²		
Longueur de l'échantillon, L _f		15,03 cm		
Volume de sol, V		1 189,05 cm ³		
Aire du réservoir intrant, a _{in}		1,81 cm ²		
Aire du réservoir extrant, a _{out}		1,82 cm ²		
Température eau, T		25,7 °C		
Densité sèche sol, ρ _s		2,74 g/cm ³		
Densité sèche initial, ρ _{di}		1,30 g/cm ³		
Densité sèche finale, ρ _{df}		1,30 g/cm ³		
Densité de l'eau, ρ _w		0,997 g/cm ³		
Facteur de correction, R _T à 20°C		0,853		
Précision de la balance utilisée:		2 g		
Méthode de préparation de l'échantillon:				
Moyenne k20		2,0E-02 cm/s		
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard				
Masse humide à la fin de l'essai non enregistrée. Masse sèche au démontage non enregistrée.				

Tableau J.2 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge variable (8 août 2013)

Mesures et calculs								
Test no.	Charge entrée (H ₁)	Gradient hydraulique initial (i _i)	Charge sortie (H ₂)	Temps (t)	Δ Temps (Δt)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Volume d'eau intrant
	cm		cm	s	s	cm/s	cm/s	cm ³
1	92,7	6,17	44,7	-	-			
1	90,7	6,03	46,6	2,36	2,36	4,87E-02	4,15E-02	-
1	88,7	5,90	48,6	5,26	2,90	3,58E-02	3,05E-02	3,9
1	86,7	5,77	50,3	7,98	2,72	3,45E-02	2,94E-02	7,9
1	84,7	5,63	52,6	11,48	3,50	2,34E-02	2,00E-02	11,6
1	82,7	5,50	54,6	15,09	3,61	1,98E-02	1,69E-02	15,9
1	80,7	5,37	56,6	19,23	4,14	1,47E-02	1,26E-02	19,9
1	78,7	5,23	58,6	23,76	4,53	1,12E-02	9,54E-03	23,9
1	76,6	5,10	60,8	29,57	5,81	6,90E-03	5,89E-03	27,9
1	74,6	4,96	62,6	35,95	6,38	4,78E-03	4,07E-03	32,0
1	72,6	4,83	64,6	44,67	8,72	2,33E-03	1,99E-03	35,8

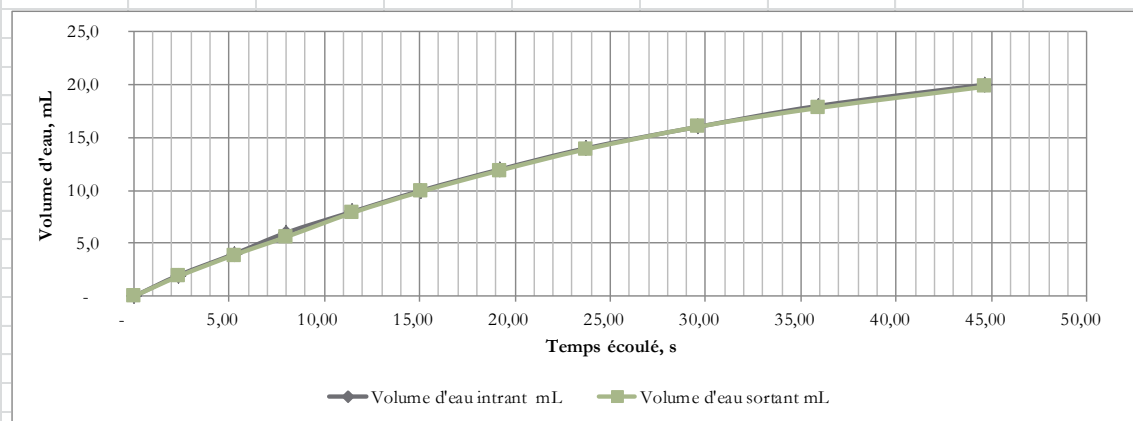
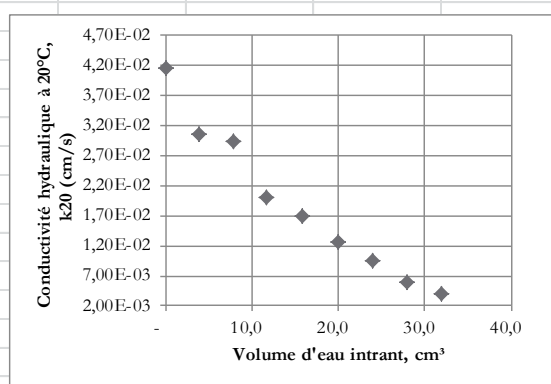
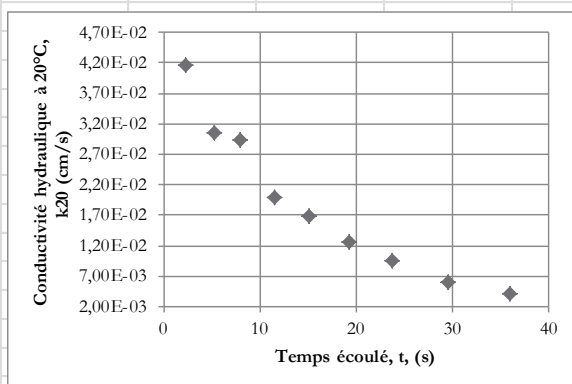


Tableau J.3 : Données de l'essai de perméabilité à charge variable (8 août 2013) #2

Conductivité hydraulique à charge variable des roches stériles						
Mine Tio - 0-10mm tamisé						
Échantillon reçu été 2013						
Information générale						
Testé par:						
Laboratoire IRME						
Date testé:		08-août-13				
Projet:						
Détails du test						
Diamètre max. particules				10	mm	
Diamètre du moule, D			10,035	cm		
Masse cellule vide et connections, M ₁			3072,6	g		
Masse cellule eau désaéré et connections, M _e			4198,1	g		
Masse cellule sol, air, connections, M ₂			5008,3	g		
Masse cellule sol, eau, air, connections, M _{tot}			5351	g	Inconnu	
Masse sèche du sol, M _s			1 935,70	g	Calculé	
Masse sol humide, M _{ms}			2 338,23	g		
Masse eau, M _w			402,53	g		
Masse sèche du sol, M _s			1935,7	g		
Masse eau, M _{win}			479,20	g	Inconnu	
Masse eau, M _{wf}			479,20	g	Inconnu	
Teneur en eau massique initiale, w _{in}			24,8	%		
Teneur en eau massique finale, w _f			24,8	%		
Densité relative du sol, G _s			2,745			
Indice des vides, e			0,681			
Porosité initial, n			0,405			
Volume des vides, V _v			481,7	cm ³		
Volume des pores, V _p			481,7	cm ³		
Volume eau, V _w			480,7	cm ³		
Niveau de saturation			99,8	%		
Aire de l'échantillon, A			79,09	cm ²		
Longueur de l'échantillon, L _f			15,03	cm		
Volume de sol, V			1 189,05	cm ³		
Aire du réservoir intrant, a _{in}			1,81	cm ²		
Aire du réservoir extrant, a _{out}			1,82	cm ²		
Température eau, T			25,7	°C		
Densité sèche sol, ρ _s			2,74	g/cm ³		
Densité sèche initial, ρ _{di}			1,30	g/cm ³		
Densité sèche finale, ρ _{df}			1,30	g/cm ³		
Densité de l'eau, ρ _w			0,997	g/cm ³		
Facteur de correction, R _T à 20°C			0,853			
Précision de la balance utilisée:			2 g			
Méthode de préparation de l'échantillon:						
Moyenne k20		1,8E-02		cm/s		
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard						
Masse humide à la fin de l'essai non enregistrée. Masse sèche au démontage non enregistrée.						

Tableau J.4 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge variable (8 août 2013) #2

Mesures et calculs								
Test no.	Charge entrée (H_1)	Gradient hydraulique initial (i_i)	Charge sortie (H_2)	Temps (t)	Δ Temps (Δt)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k_{20})	Volume d'eau intrant
	cm		cm	s	s	cm/s	cm/s	cm ³
2	88,7	5,90	41,9	-	-			
2	86,7	5,77	43,9	2,73	2,73	4,30E-02	3,67E-02	20,1
2	84,7	5,63	45,9	5,51	2,78	3,80E-02	3,24E-02	24,1
2	82,7	5,50	48,1	8,82	3,31	2,82E-02	2,41E-02	28,1
2	80,7	5,37	49,9	12,22	3,40	2,43E-02	2,08E-02	32,3
2	78,7	5,23	52,0	16,22	4,00	1,78E-02	1,52E-02	36,1
2	76,7	5,10	53,9	20,70	4,48	1,35E-02	1,15E-02	40,2
2	74,7	4,97	55,9	25,77	5,07	9,82E-03	8,37E-03	44,1
2	72,6	4,83	58,0	32,06	6,29	6,20E-03	5,29E-03	48,1
2	70,6	4,70	60,0	40,20	8,14	3,48E-03	2,97E-03	52,1

Conductivité hydraulique à 20°C, k_{20} (cm/s)

Temps écoulé, t , (s)

Conductivité hydraulique à 20°C, k_{20} (cm/s)

Volume d'eau intrant, cm³

Volume d'eau, mL

Temps écoulé, s

— Volume d'eau intrant mL — Volume d'eau sortant mL

Tableau J.5 : Données de l'essai de perméabilité à charge constante (8 août 2013) #3

Conductivité hydraulique à charge constante des roches stériles					
Mine Tio - 0-10mm tamisé					
Échantillon reçu été 2013					
Information générale					
Testé par:					
Laboratoire IRME					
Date testé: 8 aout 2013					
Projet:					
Détails du test					
Diamètre max. particules			10	mm	
Diamètre du moule, D			10,035	cm	
Espacement entre le ports de lecture, Lc:			6,286	cm	
Masse cellule vide et connections, M ₁			3072,6	g	
Masse cellule eau désaéré et connections, M _e			4198,1	g	
Masse cellule sol, air, connections, M ₂			5008,3	g	
Masse cellule sol, eau, air, connections, M _{tot}			5351	g	Inconnu
Masse sèche du sol, M _s			1 935,70	g	Calculé
Masse sol humide, M _{ms}			2 338,27	g	
Masse sèche du sol, M _s			1935,7	g	
Masse eau, M _{win}			402,57	g	Calculé
Masse eau, M _{wf}			479,26	g	Inconnu
Teneur en eau massique initiale, w _{in}			20,80	%	
Teneur en eau massique finale, w _f			24,76	%	
Densité relative du sol, Gs			2,745		
Indice des vides, e			0,681		
Porosité initial, n			0,405		
Volume des vides, V _v			481,7	cm ³	
Volume des pores, V _p			481,7	cm ³	
Volume eau, V _w			403,8	cm ³	
Niveau de saturation			84	%	
Aire de l'échantillon, A			79,09	cm ²	
Longueur de l'échantillon, L _f			15,03	cm	
Volume de sol, V			1 189,09	cm ³	
Température eau, T			25,7	°C	
Densité sèche sol, ρ _s			2,74	g/cm ³	
Densité sèche initial, ρ _{di}			1,35	g/cm ³	
Densité sèche finale, ρ _{df}			1,30	g/cm ³	
Densité de l'eau, ρ _w			0,997	g/cm ³	
Facteur de correction, R _T à 20°C			0,853		
Précision de la balance utilisée:			2	g	
Méthode de préparation de l'échantillon:		Méthode D			
Moyenne k20	7,0E-03	cm/s			
Moyenne k20	1,5E-02	cm/s			
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard					
Masse humide à la fin de l'essai non enregistrée. Masse sèche au démontage non enregistrée.					

Tableau J.6 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge constante (8 août 2013) #3

Mesures et calculs								
Test no.	Changement de charge (Δh)	Gradient hydraulique (i)	Volume (Q)	Temps (t)	Débit (q)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Porosité pendant l'essai N _{PV}
	cm		cm ³	s	cm ³ /s	cm/s	cm/s	
1	2,6	0,41	5,02	13,86	0,36	1,11E-02	9,44E-03	0,01
2	2,6	0,41	10,03	30,86	0,33	9,94E-03	8,48E-03	0,02
3	2,6	0,41	15,05	48,36	0,31	9,51E-03	8,11E-03	0,03
4	2,6	0,41	20,06	65,7	0,31	9,33E-03	7,96E-03	0,04
5	2,6	0,41	25,08	81,23	0,31	9,44E-03	8,05E-03	0,05
6	2,6	0,41	30,09	98,39	0,31	9,35E-03	7,98E-03	0,06
7	2,6	0,41	35,11	115,77	0,30	9,27E-03	7,91E-03	0,07
8	2,6	0,41	40,13	232,13	0,17	5,28E-03	4,51E-03	0,08
9	2,6	0,41	45,14	148,8	0,30	9,27E-03	7,91E-03	0,09
10	2,6	0,41	50,16	166,39	0,30	9,21E-03	7,86E-03	0,10
1	3,7	0,59	5,02	12,22	0,41	2,11E-02	1,80E-02	0,01
2	3,7	0,59	10,03	27,22	0,37	1,89E-02	1,62E-02	0,02
3	3,7	0,59	15,05	44,16	0,34	1,75E-02	1,49E-02	0,03
4	3,7	0,59	20,06	56,07	0,36	1,84E-02	1,57E-02	0,04
5	3,7	0,59	25,08	70,48	0,36	1,83E-02	1,56E-02	0,05
6	3,7	0,59	30,09	84,61	0,36	1,83E-02	1,56E-02	0,06
7	3,7	0,59	35,11	98,86	0,36	1,82E-02	1,56E-02	0,07
8	3,7	0,59	40,13	113,8	0,35	1,81E-02	1,55E-02	0,08
9	3,7	0,59	45,14	128,09	0,35	1,81E-02	1,54E-02	0,09
10	3,7	0,59	50,16	142,45	0,35	1,81E-02	1,54E-02	0,10
Conductivité hydraulique à 20°C, k ₂₀ (cm/s)			Temps écoulé, t, (s)					
Conductivité hydraulique à 20°C, k ₂₀ (cm/s)			Porosité pendant l'essai, NPV					

Tableau J.7 : Données de l'essai de perméabilité à charge variable (1 décembre 2013) #4

Conductivité hydraulique à charge variable des roches stériles						
Mine Tio - 0-10mm tamisé						
Échantillon reçu été 2013						
Information générale						
Testé par:	Patrick Gagnon					
Laboratoire IRME						
Date testé:	01-déc-13					
Projet:	Projet de cours au baccalauréat avec Patrick Gagnon					
Détails du test						
Diamètre max. particules						10 mm
Diamètre du moule, D						10,289 cm
Masse cellule vide et connections, M ₁						3193,39 g Calculé
Masse cellule eau désaéré et connections, M _e						4185 g
Masse cellule sol, air, connections, M ₂						4 916,8 g Inconnu
Masse cellule sol, eau, air, connections, M _{tot}						5283 g
Masse sol humide, M _{ms}						1974,5 g
Masse sèche du sol, M _s						1723,4 g Mesuré
Masse eau, M _{win}						366,2 g
Masse eau, M _{wf}						251,1 g Mesuré
Teneur en eau massique initiale, w _{in}						21,2 %
Teneur en eau massique finale, w _f						14,6 %
Densité relative du sol, G _s						2,745
Indice des vides, e						0,575
Porosité initial, n						0,365
Volume des vides, V _v						362,1 cm ³
Volume eau, V _w						367,2 cm ³
Degré de saturation						101 %
Aire de l'échantillon, A						83,15 cm ²
Longueur de l'échantillon, L _f						11,93 cm
Volume de sol, V						991,67 cm ³
Aire du réservoir intrant, a _{in}						1,818 cm ²
Aire du réservoir extrant, a _{out}						1,852 cm ²
Température eau, T						24 °C
Densité sèchel, ρ _s						2,74 g/cm ³
Densité sèche initial, ρ _{di}						1,43 g/cm ³
Densité sèche finale, ρ _{df}						1,52 g/cm ³
Densité de l'eau, ρ _w						0,997 g/cm ³
Facteur de correction, R _T à 20°C						0,894
Précision de la balance utilisée:						2 g
Méthode de préparation de l'échantillon:	Méthode D					
Moyenne k20 4,7E-02 cm/s						
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard						
Selon la procédure standard ASTM D5856-95(2002), le gradient hydraulique maximal recommandé est de 2 pour un sol dont la conductivité hydraulique prédite est à plus de 10 ⁻⁴ cm/s.						

Tableau J.8 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge variable (1 décembre 2013) #4

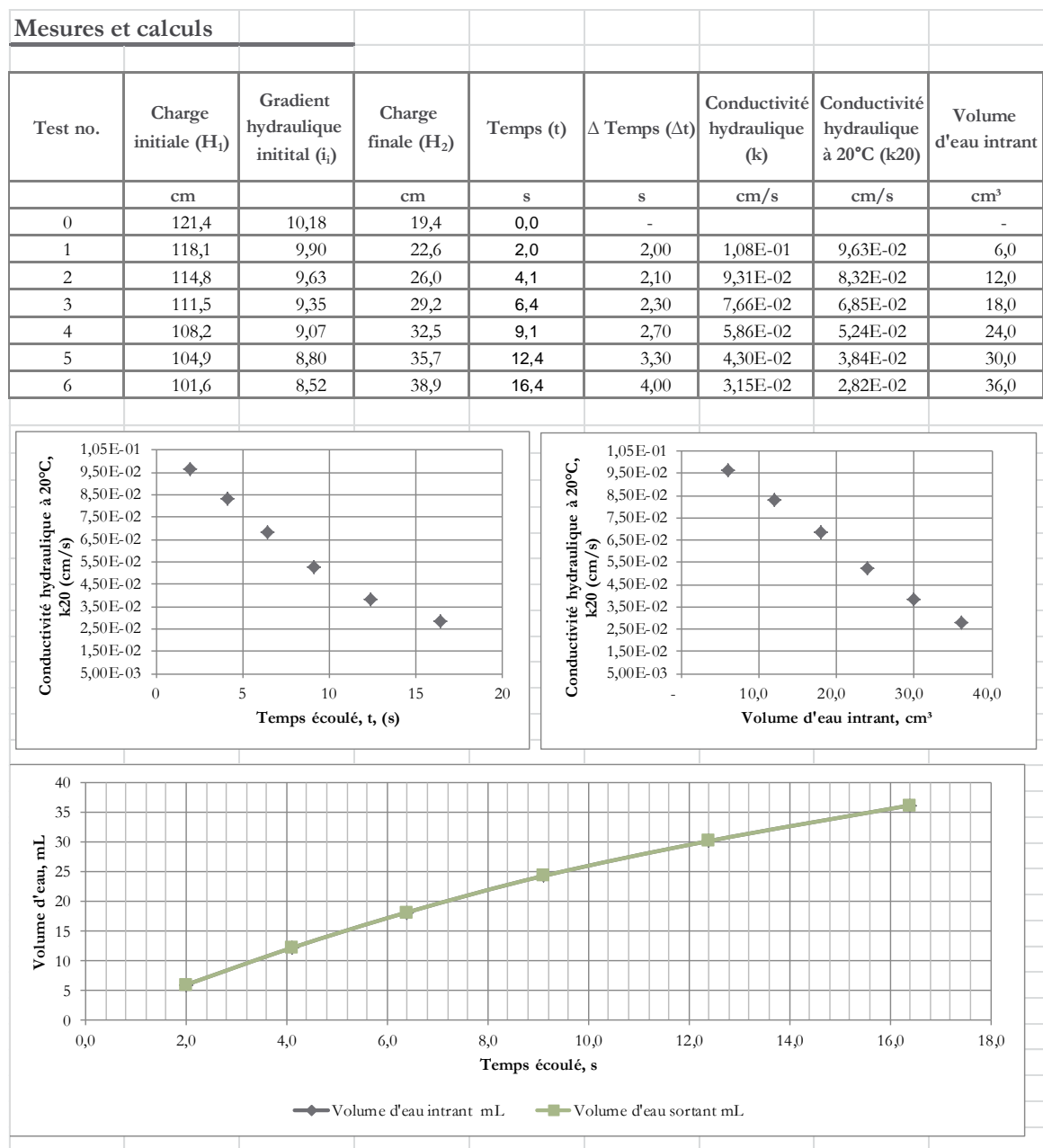


Tableau J.9 : Données de l'essai de perméabilité à charge constante (1 décembre 2013) #5

Conductivité hydraulique à charge constante des roches stériles									
Mine Tio - 0-10mm tamisé									
Échantillon reçu été 2013									
Information générale									
Testé par:		Patrick Gagnon							
Laboratoire		IRME							
Date testé:		01-déc-13							
Projet:		Projet de cours au baccalauréat avec Patrick Gagnon							
Détails du test									
Diamètre max. particules		10 mm							
Diamètre du moule, D		10,289 cm							
Espacement entre le ports de lecture, Lc:		5,95 cm							
Masse cellule vide et connections, M ₁		3193,39 g Calculé							
Masse cellule eau désaéré et connections, M _e		4185 g							
Masse cellule sol, air, connections, M ₂		4 916,8 g							
Masse cellule sol, eau, air, connections, M _{tot}		5279 g							
Masse sol humide, M _{ms}		1974,5 g							
Masse sèche du sol, M _s		1723,4 g							
Masse eau, M _{win}		362,2 g							
Masse eau, M _{wf}		366,2 g							
Teneur en eau massique initiale, w _{in}		21,0 %							
Teneur en eau massique finale, w _f		21,2 %							
Densité relative du sol, G _s		2,745							
Indice des vides, e		0,574							
Porosité initial, n		0,365							
Volume des vides, V _v		361,7 cm ³							
Volume eau, V _w		363,4 cm ³							
Niveau de saturation		100 %							
Aire de l'échantillon, A		83,15 cm ²							
Longueur de l'échantillon, L _f		11,927 cm							
Volume de sol, V		991,67 cm ³							
Température eau, T		26,5 °C							
Densité sèchel, ρ _s		2,74							
Densité sèche initial, ρ _{di}		1,44 g/cm ³							
Densité sèche finale, ρ _{df}		1,43 g/cm ³							
Densité de l'eau, ρ _w		0,997 g/cm ³							
Facteur de correction, R _T à 20°C		0,835							
Précision de la balance utilisée:		2 g							
Méthode de préparation de l'échantillon:		Méthode D							
Moyenne k20		1,2E-01 cm/s							
Moyenne k20		1,0E-01 cm/s							
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard									
Selon la procédure standard ASTM D5856-95(2002), le gradient hydraulique maximal recommandé est de 2 pour un sol don't la conductivité hydraulique prédite est à plus de 10-4 cm/s.									

Tableau J.10 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge constante (1 décembre 2013) #5

Mesures et calculs								
Test no.	Changement de charge (Δh)	Gradient hydraulique (i)	Volume (Q)	Temps (t)	Débit (q)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Porosité pendant l'essai N_{pv}
	cm		cm ³	s	cm ³ /s	cm/s	cm/s	
1	0,46	0,08	2	3,18	0,63	1,96E-01	1,64E-01	0,01
2	0,46	0,08	2	3,27	0,61	1,91E-01	1,59E-01	0,01
3	0,46	0,08	2	3,4	0,59	1,83E-01	1,53E-01	0,01
4	0,46	0,08	2	3,71	0,54	1,68E-01	1,40E-01	0,01
5	0,46	0,08	2	4,07	0,49	1,53E-01	1,28E-01	0,01
6	0,46	0,08	2	4,51	0,44	1,38E-01	1,15E-01	0,01
7	0,46	0,08	2	4,64	0,43	1,34E-01	1,12E-01	0,01
8	0,46	0,08	2	3,84	0,52	1,62E-01	1,36E-01	0,01
1	0,6	0,10	2	5,4	0,37	8,85E-02	7,39E-02	0,01
2	0,6	0,10	2	2,91	0,69	1,64E-01	1,37E-01	0,01
3	0,6	0,10	2	3,7	0,54	1,29E-01	1,08E-01	0,01
4	0,6	0,10	2	3,27	0,61	1,46E-01	1,22E-01	0,01
5	0,6	0,10	2	3,76	0,53	1,27E-01	1,06E-01	0,01
6	0,6	0,10	2	4,01	0,50	1,19E-01	9,95E-02	0,01
7	0,6	0,10	2	4,01	0,50	1,19E-01	9,95E-02	0,01
8	0,6	0,10	2	3,71	0,54	1,29E-01	1,08E-01	0,01

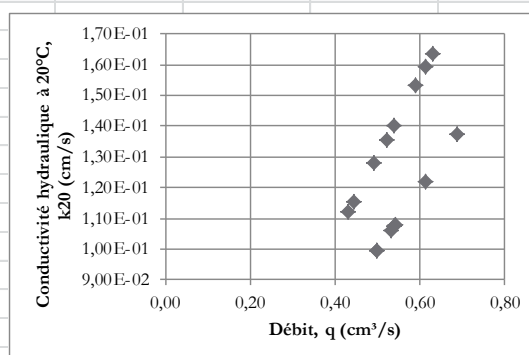
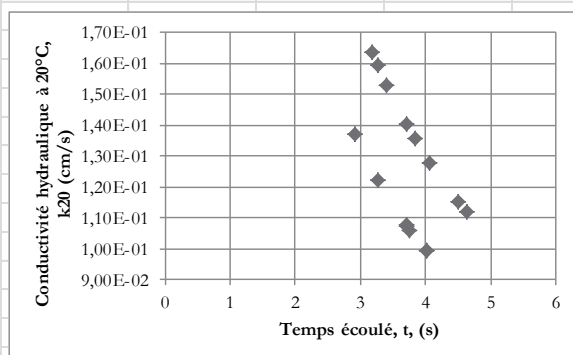


Tableau J.11 : Données de l'essai de perméabilité à charge variable (24 janvier 2014) #6

Conductivité hydraulique à charge variable des roches stériles						
Mine Tio - 0-10mm tamisé						
Échantillon reçu été 2013						
Information générale						
Testé par:		Noura El-Harrak				
Laboratoire IRME						
Date testé:		24-janv-14				
Projet:		Cuve sol montage 2				
Détails du test						
Diamètre max. particules						10 mm
Diamètre du moule, D		8,194				cm
Masse cellule eau désaéré et connections, M_e		3 997,0				g
Masse cellule sol, eau, air, connections, M_{tot}		4 854,0				g
Masse sol humide, M_{ms}		1 530,8				g
Masse sèche du sol, M_s		1 357,5				g
Masse eau, M_{win}		152,5				g
Masse eau, M_{wf}		173,3				g
Teneur en eau massique initiale, w_{in}		11,2				%
Teneur en eau massique finale, w_f		12,8				%
Densité relative du sol, G_s		2,745				
Indice des vides, e		0,32				
Porosité initial, n		0,24				
Volume des vides, V_v		157,4				cm ³
Volume des pores, V_p		157,4				cm ³
Volume eau, V_w		152,8				cm ³
Niveau de saturation		96,2				%
Aire de l'échantillon, A		52,73				cm ²
Longueur de l'échantillon, L_f		12,382				cm
Volume de sol, V		652,94				cm ³
Aire du réservoir intrant, a_{in}		1,82				cm ²
Aire du réservoir extrant, a_{out}		1,85				cm ²
Température eau, T		21,2				°C
Densité sèche, ρ_s		2,74				
Densité sèche initial, ρ_{di}		1,87				g/cm ³
Densité sèche finale, ρ_{df}		1,84				g/cm ³
Densité de l'eau, ρ_w		0,998				g/cm ³
Facteur de correction, R_T à 20°C		0,966				
Précision de la balance utilisée:						g
Méthode de préparation de l'échantillon:		Méthode D				
Moyenne k20		8,7E-03 cm/s				
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard						
Selon la procédure standard ASTM D5856-95(2002), le gradient hydraulique maximal recommandé est de 2 pour un sol don't la conductivité hydraulique prédite est à plus de 10 ⁻⁴ cm/s.						

Tableau J.12 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge variable (24 janvier 2014) #6

Mesures et calculs								
Test no.	Charge initiale (H_1)	Gradient hydraulique initial (i_i)	Charge finale (H_2)	Temps (t)	Δ Temps (Δt)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Volume d'eau intrant
	cm		cm	s	s	cm/s	cm/s	cm ³
0	73,50	5,94	28,60	0,0				
1	70,20	5,67	25,04	15,9	15,94	1,39E-02	1,35E-02	6
2	66,90	5,40	21,80	33,4	17,49	1,38E-02	1,33E-02	12
3	63,60	5,14	18,66	55,1	21,69	1,22E-02	1,18E-02	18
4	60,30	4,87	15,53	82,6	27,43	1,07E-02	1,03E-02	24
5	57,00	4,60	12,19	124,4	41,86	7,94E-03	7,67E-03	30
6	53,70	4,34	8,95	199,7	75,24	5,13E-03	4,96E-03	36

Tableau J.13 : Données de l'essai de perméabilité à charge constante (24 janvier 2014) #7

Conductivité hydraulique à charge constante des roches stériles					
Mine Tio - 0-10mm tamisé					
Échantillon reçu été 2013					
Information générale					
Testé par:	Noura El-Harrak				
Laboratoire IRME					
Date testé:	24-janv-14				
Projet:	Cuve sol montage 2				
Détails du test					
Diamètre max. particules					10 mm
Diamètre du moule, D					8,194 cm
Espacement entre le ports de lecture, Lc:					6,4375 cm
Masse cellule eau désaéré et connections, M _e					3997 g
Masse cellule sol, eau, air, connections, M _{tot}					4854 g
Masse sol humide, M _{ms}					1530,8 g
Masse sèche du sol, M _s					1357,5 g
Masse eau, M _{win}					152,49 g
Masse eau, M _{wf}					151,19 g
Teneur en eau massique initiale, w _{in}					11,2 %
Teneur en eau massique finale, w _f					11,1 %
Densité relative du sol, G _s					2,745
Indice des vides, e					0,318
Porosité initial, n					0,241
Volume des vides, V _v					157,4 cm³
Volume des pores, V _p					157,4 cm³
Volume eau, V _w					152,8 cm³
Niveau de saturation					97,1 %
Aire de l'échantillon, A					52,737 cm²
Longueur de l'échantillon, L _f					12,382 cm
Volume de sol, V					653,0 cm³
Température eau, T					21,2 °C
Densité sèche, ρ _s					2,74
Densité sèche initial, ρ _{di}					1,87 g/cm³
Densité sèche finale, ρ _{df}					1,87 g/cm³
Densité de l'eau, ρ _w					0,998 g/cm³
Facteur de correction, R _T à 20°C					0,966
Précision de la balance utilisée:					g
Méthode de préparation de l'échantillon:	Méthode D				
Moyenne k20	4,1E-03	cm/s	4,1E-03	cm/s	
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard					
Selon la procédure standard ASTM D5856-95(2002), le gradient hydraulique maximal recommandé est de 2 pour un sol don't la conductivité hydraulique prédite est à plus de 10-4 cm/s.					

Tableau J.14 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge constante (24 janvier 2014) #7

Mesures et calculs								
Test no.	Changement de charge (Δh)	Gradient hydraulique (i)	Volume (Q)	Temps (t)	Débit (q)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Porosité pendant l'essai N _{PV}
	cm		cm ³	s	cm ³ /s	cm/s	cm/s	
1	9,8	1,52	4	48,57	0,08			
2	9,8	1,52	4	22,63	0,18	4,23E-03	4,09E-03	0,03
3	9,8	1,52	4	23,43	0,17	4,09E-03	3,95E-03	0,03
4	9,8	1,52	4	23,42	0,17	4,09E-03	3,95E-03	0,03
5	9,8	1,52	4	20,47	0,20	4,68E-03	4,52E-03	0,03
6	9,8	1,52	4	22,5	0,18	4,26E-03	4,12E-03	0,03
1	10,6	1,65	5	28,32	0,18	3,91E-03	3,78E-03	0,03
2	10,6	1,65	5	28,17	0,18	3,93E-03	3,80E-03	0,03
3	10,6	1,65	5	25,32	0,20	4,37E-03	4,23E-03	0,03
4	10,6	1,65	5	22,2	0,23	4,99E-03	4,82E-03	0,03
5	10,6	1,65	5	34,21	0,15	3,24E-03	3,13E-03	0,03
6	10,6	1,65	5	24,19	0,21	4,58E-03	4,42E-03	0,03

Conductivité hydraulique à 20°C, k₂₀ (cm/s)

Temps écoulé, t, (s)

Conductivité hydraulique à 20°C, k₂₀ (cm/s)

Porosité pendant l'essai, NPV

Tableau J.15 : Données de l'essai de perméabilité à charge variable (23 juillet 2014) #8

Conductivité hydraulique à charge constante des roches stériles									
Mine Tio - 0-10mm tamisé									
Échantillon reçu été 2013									
Information générale									
Testé par:		Jérôme Goyer							
Laboratoire		IRME							
Date testé:		23-juil-14 Essai 1							
Projet:		Cellule #1 pour l'obtention de la teneur en eau résiduelle du sol							
Détails du test									
Diamètre max. particules		10 mm							
Diamètre du moule, D		15,15 cm							
Masse cellule vide et connections, M ₁		7511,5 g Masse mesuré au démontage							
Masse cellule eau désaéré et connections, M _e		11 989,3 g Estimé							
Masse cellule sol, air, connections, M ₂		15 052,4 g							
Masse cellule sol, eau, air, connections, M _{tot}		16688,7 g							
Masse sol humide, M _{ms}		8 510,2 g							
Masse sèche du sol, M _s		7 540,90 g Masse mesuré au démontage							
Masse eau, M _{win}		969,33 g							
Masse eau, M _{wf}		969,53 g							
Teneur en eau massique initiale, w _{in}		12,9 %							
Teneur en eau massique finale, w _f		12,9 %							
Densité relative du sol, G _s		2,745							
Indice des vides, e		0,387							
Porosité initial, n		0,279							
Volume des vides, V _v		1 067,1 cm ³							
Volume des pores, V _p		1 067,1 cm ³							
Volume eau, V _w		972,4 cm ³							
Niveau de saturation		91,1 %							
Aire de l'échantillon, A		180,22 cm ²							
Longueur de l'échantillon, L _f		21,21 cm							
Volume total, V _t		3 823,12 cm ³							
Température eau, T		26 °C							
Densité sèche initial, ρ _{di}		1,75 g/cm ³							
Densité sèche finale, ρ _{df}		1,75 g/cm ³							
Densité de l'eau, ρ _w		0,997 g/cm ³							
Facteur de correction, R _T à 20°C		0,846							
Précision de la balance utilisée:		0,1 g							
Méthode de préparation de l'échantillon:									
Moyenne k20		4,6E-03 cm/s							
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard									
Selon la procédure standard ASTM D5856-95(2002), le gradient hydraulique maximal recommandé est de 2 pour un sol dont la conductivité hydraulique prédite est à plus de 10 ⁻⁴ cm/s. La masse de la cellule avec de l'eau désaérée n'a pas été enregistrée.									

Tableau J.16 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge variable (23 juillet 2014) #8

Mesures et calculs								
Test no.	Changement de charge (Δh)	Gradient hydraulique (i)	Volume (Q)	Temps (t)	Débit (q)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Porosité pendant l'essai N_{pv}
	cm		cm ³	s	cm ³ /s	cm/s	cm/s	
1	43	2,03	-	-				
2	43	2,03	8,83	5,00	1,77	4,83E-03	4,09E-03	0,01
3	43	2,03	18,66	10,00	1,87	5,11E-03	4,32E-03	0,01
4	43	2,03	28,79	15,00	1,92	5,25E-03	4,45E-03	0,01
5	43	2,03	37,92	20,00	1,90	5,19E-03	4,39E-03	0,01
6	43	2,03	48,36	25,00	1,93	5,29E-03	4,48E-03	0,01
7	43	2,03	57,38	30,00	1,91	5,24E-03	4,43E-03	0,01
8	43	2,03	69,42	35,00	1,98	5,43E-03	4,59E-03	0,01
9	43	2,03	78,65	40,00	1,97	5,38E-03	4,55E-03	0,01
10	43	2,03	88,58	45,00	1,97	5,39E-03	4,56E-03	0,01
11	43	2,03	98,01	50,00	1,96	5,37E-03	4,54E-03	0,01
12	43	2,03	107,24	55,00	1,95	5,34E-03	4,52E-03	0,01
13	43	2,03	116,57	60,00	1,94	5,32E-03	4,50E-03	0,01
14	43	2,03	127,51	65,00	1,96	5,37E-03	4,54E-03	0,01
15	43	2,03	137,64	70,00	1,97	5,38E-03	4,55E-03	0,01
16	43	2,03	146,67	75,00	1,96	5,35E-03	4,53E-03	0,01
17	43	2,03	156,40	80,00	1,96	5,35E-03	4,53E-03	0,01
18	43	2,03	167,74	85,00	1,97	5,40E-03	4,57E-03	0,01
19	43	2,03	176,77	90,00	1,96	5,38E-03	4,55E-03	0,01
20	43	2,03	186,80	95,00	1,97	5,38E-03	4,55E-03	0,01
21	43	2,03	196,43	100,00	1,96	5,38E-03	4,55E-03	0,01
22	43	2,03	206,96	105,00	1,97	5,40E-03	4,57E-03	0,01
23	43	2,03	217,00	110,00	1,97	5,40E-03	4,57E-03	0,01
24	43	2,03	226,53	115,00	1,97	5,39E-03	4,56E-03	0,01
25	43	2,03	236,66	120,00	1,97	5,40E-03	4,57E-03	0,01
26	43	2,03	247,29	130,00	1,90	5,21E-03	4,41E-03	0,01
27	43	2,03	275,88	140,00	1,97	5,39E-03	4,56E-03	0,03
28	43	2,03	295,05	150,00	1,97	5,38E-03	4,56E-03	0,02
29	43	2,03	315,31	160,00	1,97	5,39E-03	4,56E-03	0,02
30	43	2,03	336,28	170,00	1,98	5,41E-03	4,58E-03	0,02
31	43	2,03	354,74	180,00	1,97	5,39E-03	4,56E-03	0,02
32	43	2,03	375,40	190,00	1,98	5,41E-03	4,58E-03	0,02
33	43	2,03	394,87	200,00	1,97	5,40E-03	4,57E-03	0,02
34	43	2,03	413,63	210,00	1,97	5,39E-03	4,56E-03	0,02
35	43	2,03	434,90	220,00	1,98	5,41E-03	4,58E-03	0,02
36	43	2,03	452,45	230,00	1,97	5,38E-03	4,56E-03	0,02
37	43	2,03	472,21	240,00	1,97	5,39E-03	4,56E-03	0,02
38	43	2,03	492,78	250,00	1,97	5,40E-03	4,57E-03	0,02
39	43	2,03	515,65	260,00	1,98	5,43E-03	4,59E-03	0,02
40	43	2,03	531,50	270,00	1,97	5,39E-03	4,56E-03	0,01

Tableau J.17 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge variable (23 juillet 2014) #8 (suite)

41	43	2,03	551,97	280,00	1,97	5,40E-03	4,57E-03	0,02
42	43	2,03	572,03	290,00	1,97	5,40E-03	4,57E-03	0,02
43	43	2,03	592,10	300,00	1,97	5,40E-03	4,57E-03	0,02
44	43	2,03	652,29	330,00	1,98	5,41E-03	4,58E-03	0,06
45	43	2,03	711,78	360,00	1,98	5,41E-03	4,58E-03	0,06
46	43	2,03	769,37	390,00	1,97	5,40E-03	4,57E-03	0,05
47	43	2,03	828,46	420,00	1,97	5,40E-03	4,57E-03	0,06
48	43	2,03	890,06	450,00	1,98	5,41E-03	4,58E-03	0,06
49	43	2,03	948,44	480,00	1,98	5,41E-03	4,58E-03	0,05
50	43	2,03	1 001,01	510,00	1,96	5,37E-03	4,55E-03	0,05
51	43	2,03	1 066,22	540,00	1,97	5,40E-03	4,57E-03	0,06
52	43	2,03	1 125,51	570,00	1,97	5,41E-03	4,57E-03	0,06
53	43	2,03	1 188,41	600,00	1,98	5,42E-03	4,59E-03	0,06
54	43	2,03	1 302,88	660,00	1,97	5,40E-03	4,57E-03	0,11

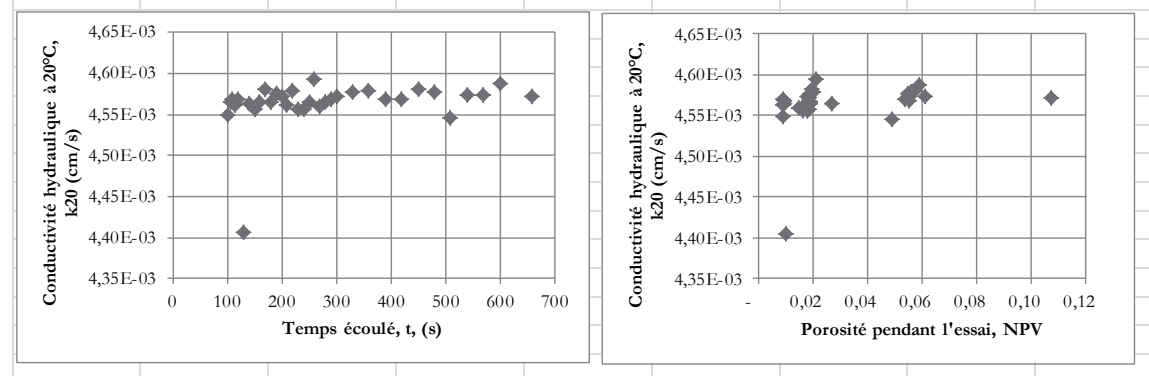


Tableau J.18 : Données de l'essai de perméabilité à charge constante (23 juillet 2014) #9

Conductivité hydraulique à charge constante des roches stériles					
Mine Tio - 0-10mm tamisé					
Échantillon reçu été 2013					
Information générale					
Testé par:		Jérôme Goyer			
Laboratoire IRME					
Date testé:		23-juil-14 Essai 2			
Projet:		Cellule #1 pour l'obtention de la teneur en eau résiduelle du sol			
Détails du test					
Diamètre max. particules		10 mm			
Diamètre du moule, D		15,15	cm		
Masse cellule vide et connections, M ₁		7511,5	g	Masse mesuré au démontage	
Masse cellule eau désaéré et connections, M _e		11 989,2	g	Estimé	
Masse cellule sol, air, connections, M ₂		15 052,4	g		
Masse cellule sol, eau, air, connections, M _{tot}		16688,7	g		
Masse sol humide, M _{ms}		8 510,2	g		
Masse sèche du sol, M _s		7 540,90	g	Masse mesuré au démontage	
Masse eau, M _{win}		969,53	g		
Masse eau, M _{wf}		969,24	g		
Teneur en eau massique initiale, w _{in}		12,9	%		
Teneur en eau massique finale, w _f		12,9	%		
Densité relative du sol, G _s		2,745			
Indice des vides, e		0,387			
Porosité initial, n		0,279			
Volume des vides, V _v		1 067,1			
Volume des pores, V _p		1 067,1	cm ³		
Volume eau, V _w		972,7	cm ³		
Niveau de saturation		91,2	%		
Aire de l'échantillon, A		180,22	cm ²		
Longueur de l'échantillon, L _f		21,21	cm		
Volume total, V _t		3 823,12	cm ³		
Température eau, T		26,1	°C		
Densité sèche initial, ρ _{di}		1,75	g/cm ³		
Densité sèche finale, ρ _{df}		1,75	g/cm ³		
Densité de l'eau, ρ _w		0,997	g/cm ³		
Facteur de correction, R _T à 20°C		0,844			
Précision de la balance utilisée:			g		
Méthode de préparation de l'échantillon:					
Moyenne k20		4,6E-03	cm/s		
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard					
Selon la procédure standard ASTM D5856-95(2002), le gradient hydraulique maximal recommandé est de 2 pour un sol don't la conductivité hydraulique prédite est à plus de 10 ⁻⁴ cm/s. La masse de la cellule avec de l'eau désaérée n'a pas été enregistrée.					

Tableau J.19 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge constante (23 juillet 2014) #9

Mesures et calculs								
Test no.	Changement de charge (Δh)	Gradient hydraulique (i)	Volume (Q)	Temps (t)	Débit (q)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Porosité pendant l'essai N_{pv}
	cm		cm ³	s	cm ³ /s	cm/s	cm/s	
1	36,6	1,73	-	-				
4	36,6	1,73	22,97	15,00	1,53	4,93E-03	4,16E-03	
5	36,6	1,73	30,00	20,00	1,50	4,82E-03	4,07E-03	0,01
6	36,6	1,73	39,43	25,00	1,58	5,07E-03	4,28E-03	0,01
7	36,6	1,73	47,35	30,00	1,58	5,08E-03	4,28E-03	0,01
8	36,6	1,73	54,98	35,00	1,57	5,05E-03	4,26E-03	0,01
9	36,6	1,73	63,81	40,00	1,60	5,13E-03	4,33E-03	0,01
10	36,6	1,73	73,24	45,00	1,63	5,23E-03	4,42E-03	0,01
11	36,6	1,73	81,06	50,00	1,62	5,21E-03	4,40E-03	0,01
12	36,6	1,73	90,09	55,00	1,64	5,27E-03	4,44E-03	0,01
13	36,6	1,73	98,72	60,00	1,65	5,29E-03	4,46E-03	0,01
14	36,6	1,73	107,25	65,00	1,65	5,31E-03	4,48E-03	0,01
15	36,6	1,73	115,98	70,00	1,66	5,33E-03	4,50E-03	0,01
16	36,6	1,73	125,71	75,00	1,68	5,39E-03	4,55E-03	0,01
17	36,6	1,73	133,43	80,00	1,67	5,36E-03	4,53E-03	0,01
18	36,6	1,73	142,76	85,00	1,68	5,40E-03	4,56E-03	0,01
19	36,6	1,73	151,19	90,00	1,68	5,40E-03	4,56E-03	0,01
20	36,6	1,73	159,62	95,00	1,68	5,40E-03	4,56E-03	0,01
21	36,6	1,73	168,24	100,00	1,68	5,41E-03	4,57E-03	0,01
22	36,6	1,73	176,47	105,00	1,68	5,41E-03	4,56E-03	0,01
23	36,6	1,73	185,20	110,00	1,68	5,41E-03	4,57E-03	0,01
24	36,6	1,73	193,22	115,00	1,68	5,40E-03	4,56E-03	0,01
25	36,6	1,73	202,76	120,00	1,69	5,43E-03	4,59E-03	0,01
26	36,6	1,73	219,51	130,00	1,69	5,43E-03	4,58E-03	0,02
27	36,6	1,73	236,36	140,00	1,69	5,43E-03	4,58E-03	0,02
28	36,6	1,73	254,62	150,00	1,70	5,46E-03	4,61E-03	0,02
29	36,6	1,73	271,58	160,00	1,70	5,46E-03	4,61E-03	0,02
30	36,6	1,73	289,24	170,00	1,70	5,47E-03	4,62E-03	0,02
31	36,6	1,73	306,49	180,00	1,70	5,48E-03	4,62E-03	0,02
32	36,6	1,73	324,25	190,00	1,71	5,49E-03	4,63E-03	0,02
33	36,6	1,73	340,00	200,00	1,70	5,47E-03	4,61E-03	0,01
34	36,6	1,73	357,86	210,00	1,70	5,48E-03	4,62E-03	0,02
35	36,6	1,73	375,11	220,00	1,71	5,48E-03	4,63E-03	0,02
36	36,6	1,73	392,57	230,00	1,71	5,49E-03	4,63E-03	0,02
37	36,6	1,73	409,93	240,00	1,71	5,49E-03	4,63E-03	0,02
38	36,6	1,73	461,89	270,00	1,71	5,50E-03	4,64E-03	0,05
39	36,6	1,73	513,96	300,00	1,71	5,51E-03	4,65E-03	0,05

Tableau J.20 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge constante (23 juillet 2014) #9
(suite)

40	36,6	1,73	565,53	330,00	1,71	5,51E-03	4,65E-03	0,05
41	36,6	1,73	617,40	360,00	1,71	5,52E-03	4,65E-03	0,05
42	36,6	1,73	669,87	390,00	1,72	5,52E-03	4,66E-03	0,05
43	36,6	1,73	721,73	420,00	1,72	5,53E-03	4,66E-03	0,05
44	36,6	1,73	773,60	450,00	1,72	5,53E-03	4,67E-03	0,05
45	36,6	1,73	825,17	480,00	1,72	5,53E-03	4,66E-03	0,05
46	36,6	1,73	878,74	510,00	1,72	5,54E-03	4,68E-03	0,05
47	36,6	1,73	928,60	540,00	1,72	5,53E-03	4,67E-03	0,05
48	36,6	1,73	980,67	570,00	1,72	5,53E-03	4,67E-03	0,05
49	36,6	1,73	1 032,14	600,00	1,72	5,53E-03	4,67E-03	0,05
50	36,6	1,73	1 135,57	660,00	1,72	5,53E-03	4,67E-03	0,10
51	36,6	1,73	1 239,11	720,00	1,72	5,53E-03	4,67E-03	0,10
52	36,6	1,73	1 345,35	780,00	1,72	5,55E-03	4,68E-03	0,10

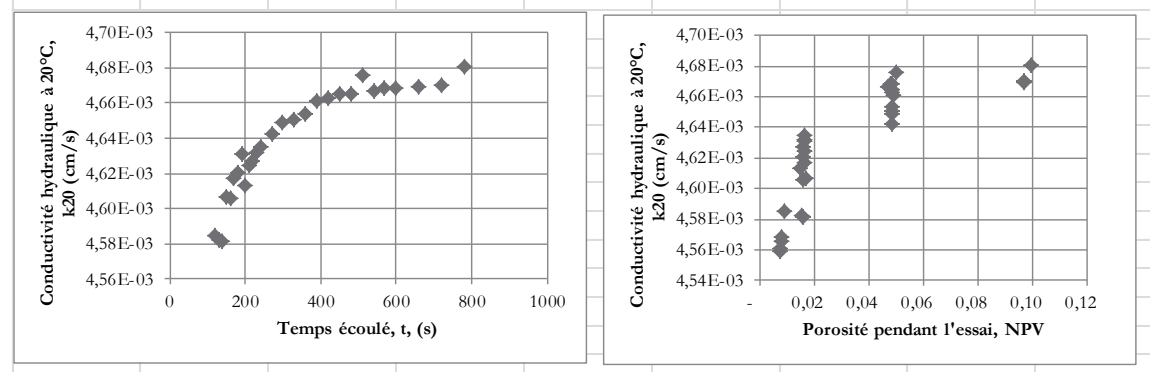
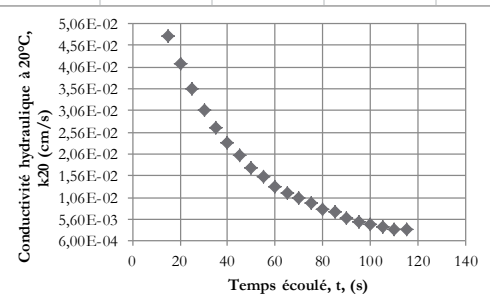
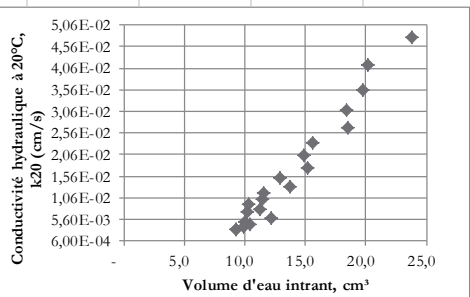


Tableau J.21 : Données de l'essai de perméabilité à charge variable (24 juillet 2014) #10

Conductivité hydraulique à charge variable des roches stériles									
Mine Tio - 0-10mm tamisé									
Échantillon reçu été 2013									
Information générale									
Testé par:		Jérôme Goyer							
Laboratoire IRME									
Date testé:		24-juil-14 Essai 1							
Projet:		Cellule #1 pour l'obtention de la teneur en eau résiduelle du sol							
Détails du test									
Diamètre max. particules		10 mm							
Diamètre du moule, D		15,15 cm							
Masse cellule vide et connections, M ₁		7511,5 g Masse mesuré au démontage							
Masse cellule eau désaéré et connections, M _e		11 990,7 g Estimé							
Masse cellule sol, air, connections, M ₂		15 052,4 g							
Masse cellule sol, eau, air, connections, M _{tot}		16687,9 g							
Masse sol humide, M _{ms}		5 619,0 g							
Masse sèche du sol, M _s		7 540,90 g Masse mesuré au démontage							
Masse eau, M _{win}		968,32 g							
Masse eau, M _{wf}		971,22 g							
Teneur en eau massique initiale, w _{in}		12,9 %							
Teneur en eau massique finale, w _f		12,9 %							
Densité relative du sol, G _s		2,745							
Indice des vides, e		0,566							
Porosité initial, n		0,361							
Volume des vides, V _v		1 068,0 cm ³							
Volume des pores, V _p		1 381,8 cm ³							
Volume eau, V _w		971,1 cm ³							
Niveau de saturation		91 %							
Aire de l'échantillon, A		180,22 cm ²							
Longueur de l'échantillon, L _f		21,21 cm							
Volume de sol, V		3 823,12 cm ³							
Aire du réservoir intrant, a _{in}		5,35 cm ²							
Aire du réservoir extrant, a _{out}		5,12 cm ²							
Température eau, T		24,8 °C							
Densité sèche initial, ρ _{di}		1,75 g/cm ³							
Densité sèche finale, ρ _{df}		1,75 g/cm ³							
Densité de l'eau, ρ _w		0,997 g/cm ³							
Facteur de correction, R _T à 20°C		0,874							
Précision de la balance utilisée:		0,1 g							
Méthode de préparation de l'échantillon:		Méthode D							
Moyenne k20		1,6E-02 cm/s							
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard									
Selon la procédure standard ASTM D5856-95(2002), le gradient hydraulique maximal recommandé est de 2 pour un sol dont la conductivité hydraulique prédite est à plus de 10 ⁻⁴ cm/s. La masse de la cellule avec de l'eau désaérée n'a pas été enregistrée.									

Tableau J.22 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge variable (24 juillet 2014) #10

Mesures et calculs								
Test no.	Charge initiale (H ₁)	Gradient hydraulique initial (i _i)	Charge finale (H ₂)	Temps (t)	Δ Temps (Δt)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Volume d'eau intrant
	cm		cm	s	s	cm/s	cm/s	cm ³
0	57,40	2,71	14,60	0				
1	54,20	2,56	17,00	5	5,00	7,14E-02	6,24E-02	30,1
2	52,20	2,46	18,90	10	5,00	6,26E-02	5,47E-02	23,2
3	50,00	2,36	20,60	15	5,00	5,46E-02	4,77E-02	23,7
4	48,40	2,28	22,40	20	5,00	4,74E-02	4,15E-02	20,1
5	46,80	2,21	24,20	25	5,00	4,06E-02	3,55E-02	19,8
6	45,40	2,14	25,60	30	5,00	3,53E-02	3,09E-02	18,4
7	43,90	2,07	26,70	35	5,00	3,06E-02	2,68E-02	18,5
8	42,90	2,02	27,80	40	5,00	2,67E-02	2,34E-02	15,6
9	42,00	1,98	28,80	45	5,00	2,32E-02	2,03E-02	14,9
10	41,00	1,93	29,60	50	5,00	2,01E-02	1,75E-02	15,2
11	40,40	1,90	30,40	55	5,00	1,75E-02	1,53E-02	12,9
12	39,60	1,87	31,00	60	5,00	1,51E-02	1,32E-02	13,8
13	39,20	1,85	31,60	65	5,00	1,33E-02	1,16E-02	11,5
14	38,80	1,83	32,00	70	5,00	1,19E-02	1,04E-02	11,4
15	38,60	1,82	32,50	75	5,00	1,06E-02	9,26E-03	10,3
16	38,20	1,80	32,90	80	5,00	9,20E-03	8,04E-03	11,3
17	38,00	1,79	33,20	85	5,00	8,32E-03	7,27E-03	10,2
18	37,40	1,76	33,50	90	5,00	6,78E-03	5,93E-03	12,2
19	37,20	1,75	33,80	95	5,00	5,90E-03	5,16E-03	10,0
20	36,90	1,74	34,00	100	5,00	5,04E-03	4,41E-03	10,4
21	36,70	1,73	34,20	105	5,00	4,34E-03	3,80E-03	9,9
22	36,60	1,73	34,40	110	5,00	3,82E-03	3,34E-03	9,3
23	36,50	1,72	34,40	115	5,00	3,65E-03	3,19E-03	9,3
24	36,30	1,71	34,50	120	5,00	3,13E-03	2,74E-03	9,8

Correction H₀ = 1,4 cm

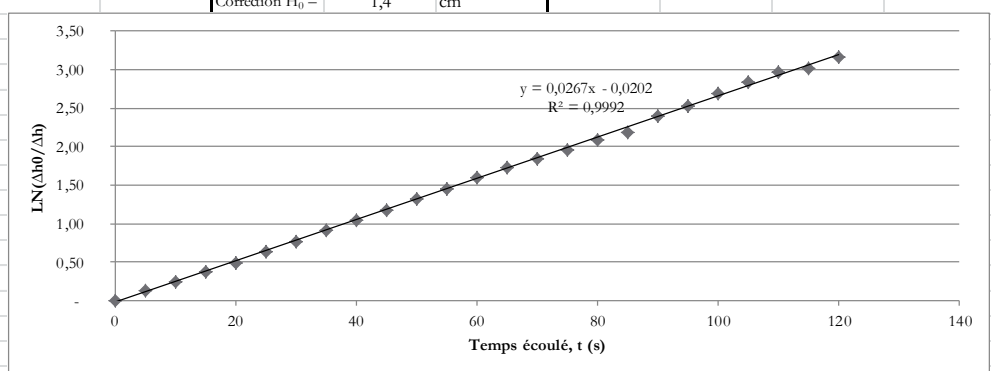


Tableau J.23 : Données de l'essai de perméabilité à charge variable (24 juillet 2014) #11

Conductivité hydraulique à charge variable des roches stériles						
Mine Tio - 0-10mm tamisé						
Échantillon reçu été 2013						
Information générale						
Testé par:	Jérôme Goyer					
Laboratoire IRME						
Date testé:	24-juil-14 Essai 2					
Projet:	Cellule #1 pour l'obtention de la teneur en eau résiduelle du sol					
Détails du test						
Diamètre max. particules						10 mm
Diamètre du moule, D		15,15				cm
Masse cellule vide et connections, M ₁		7511,5				g
Masse mesuré au démontage						
Masse cellule eau désaéré et connections, M _e		11 990,8				g
Estimé						
Masse cellule sol, air, connections, M ₂		15 052,4				g
Masse cellule sol, eau, air, connections, M _{tot}		16690,8				g
Masse sol humide, M _{ms}		4 765,1				g
Masse sèche du sol, M _s		7 540,90				g
Masse mesuré au démontage						
Masse eau, M _{win}		971,20				g
Masse eau, M _{wf}		969,00				g
inconnu						
Teneur en eau massique initiale, w _{in}		12,9				%
Teneur en eau massique finale, w _f		12,8				%
Densité relative du sol, G _s		2,745				
Indice des vides, e		0,566				
Porosité initial, n		0,361				
Volume des vides, V _v		1 068,1				
Volume des pores, V _p		1 381,9				cm ³
Volume eau, V _w		974,0				cm ³
Niveau de saturation		91				%
Aire de l'échantillon, A		180,22				cm ²
Longueur de l'échantillon, L _f		21,21				cm
Volume de sol, V		3 823,12				cm ³
Aire du réservoir intrant, a _{in}		5,35				cm ²
Aire du réservoir extrant, a _{out}		5,12				cm ²
Température eau, T		24,7				°C
Densité sèche initial, ρ _{di}		1,75				g/cm ³
Densité sèche finale, ρ _{df}		1,75				g/cm ³
Densité de l'eau, ρ _w		0,997				g/cm ³
Facteur de correction, R _T à 20°C		0,877				
Précision de la balance utilisée:						g
Méthode de préparation de l'échantillon:		Méthode D				
Moyenne k20		1,4E-02				cm/s
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard						
Selon la procédure standard ASTM D5856-95(2002), le gradient hydraulique maximal recommandé est de 2 pour un sol dont la conductivité hydraulique prédite est à plus de 10 ⁻⁴ cm/s. La masse de la cellule avec de l'eau désaérée n'a pas été enregistrée.						

Tableau J.24 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge variable (24 juillet 2014) #11

Mesures et calculs								
Test no.	Charge initiale (H ₁)	Gradient hydraulique initital (i _i)	Charge finale (H ₂)	Temps (t)	Δ Temps (Δt)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Volume d'eau intrant
	cm		cm	s	s	cm/s	cm/s	cm ³
0	57,30	2,70	16,00	0				
1	55,10	2,60	16,80	5	5,00	7,31E-02	6,41E-02	25,0
2	52,90	2,49	21,20	10	5,00	5,63E-02	4,94E-02	24,4
3	51,00	2,40	22,80	15	5,00	4,96E-02	4,35E-02	22,4
4	49,10	2,31	24,60	20	5,00	4,26E-02	3,73E-02	21,9
5	47,50	2,24	25,80	25	5,00	3,76E-02	3,30E-02	19,9
6	46,10	2,17	27,40	30	5,00	3,20E-02	2,81E-02	18,5
7	45,00	2,12	28,80	35	5,00	2,75E-02	2,41E-02	16,7
8	44,20	2,08	29,80	40	5,00	2,43E-02	2,13E-02	14,9
9	43,00	2,03	30,70	45	5,00	2,07E-02	1,82E-02	16,7
10	42,20	1,99	31,60	50	5,00	1,78E-02	1,56E-02	14,4
11	41,40	1,95	32,20	55	5,00	1,55E-02	1,36E-02	14,2
12	40,50	1,91	32,90	60	5,00	1,28E-02	1,12E-02	14,5
13	40,10	1,89	33,40	65	5,00	1,13E-02	9,87E-03	11,7
14	39,60	1,87	33,80	70	5,00	9,75E-03	8,55E-03	12,2
15	39,10	1,84	34,20	75	5,00	8,25E-03	7,23E-03	12,0
16	38,70	1,82	34,50	80	5,00	7,07E-03	6,20E-03	11,4
17	38,40	1,81	34,70	85	5,00	6,24E-03	5,47E-03	10,8
18	38,20	1,80	34,90	90	5,00	5,56E-03	4,88E-03	10,2
19	38,00	1,79	35,10	95	5,00	4,89E-03	4,29E-03	10,2
20	37,90	1,79	35,20	100	5,00	4,55E-03	3,99E-03	9,6
21	37,80	1,78	35,40	105	5,00	4,04E-03	3,54E-03	9,6
22	37,80	1,78	35,60	110	5,00	3,69E-03	3,24E-03	9,0
23	37,70	1,78	35,70	115	5,00	3,36E-03	2,94E-03	9,6
24	37,60	1,77	35,80	120	5,00	3,02E-03	2,65E-03	9,5

Tableau J.25 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge variable (24 juillet 2014) #11
(suite)

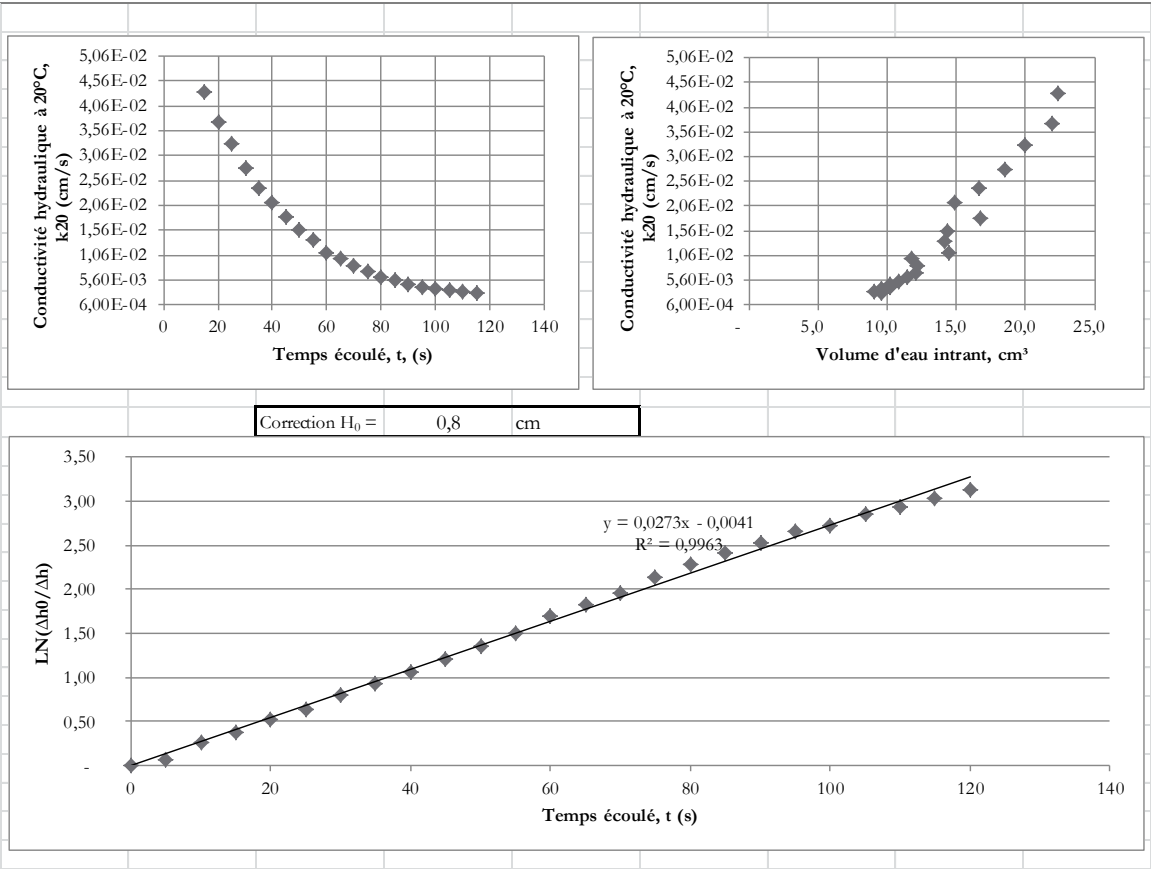


Tableau J.26 : Données de l'essai de perméabilité à charge constante (23 juillet 2014) #12

Conductivité hydraulique à charge constante des roches stériles					
Mine Tio - 0-10mm tamisé					
Échantillon reçu été 2013					
Information générale					
Testé par:	Stéphanie Letourneur				
Laboratoire IRME					
Date testé:	23-juil-14 Essai 1				
Projet:	Cellule #2 pour l'obtention de la teneur en eau résiduelle du sol				
Détails du test					
Diamètre max. particules	10 mm				
Diamètre du moule, D	14,85 cm				
Masse cellule vide et connexions, M ₁	7340 g Mesuré				
Masse cellule eau désaéré et connexions, M _e	11 779,6 g Mesuré				
Masse cellule sol, air, connexions, M ₂	14 982,7 g				
Masse cellule sol, eau, air, connexions, M _{tot}	16492,2 g				
Masse sol humide, M _{ms}	8 261,5 g				
Masse sèche du sol, M _s	7 641,70 g Mesuré				
Masse eau, M _{win}	619,80 g				
Masse eau, M _{wf}	619,70 g				
Teneur en eau massique initiale, w _{in}	8,1 %				
Teneur en eau massique finale, w _f	8,1 %				
Densité relative du sol, G _s	2,745				
Indice des vides, e	0,378				
Porosité initial, n	0,274				
Volume des vides, V _v	775,0 cm ³ Mesuré				
Volume des pores, V _p	977,1 cm ³				
Volume eau, V _w	621,8 cm ³				
Niveau de saturation	80 %				
Aire de l'échantillon, A	173,13 cm ²				
Longueur de l'échantillon, L _f	20,57 cm				
Volume total, V _t	3 560,52 cm ³				
Température eau, T	26,2 °C				
Densité sèche initial, ρ _{di}	1,99 g/cm ³				
Densité sèche finale, ρ _{df}	1,99 g/cm ³				
Densité de l'eau, ρ _w	0,997 g/cm ³				
Facteur de correction, R _T à 20°C	0,841				
Précision de la balance utilisée:					
g					
Méthode de préparation de l'échantillon:					
Moyenne k20 3,5E-04 cm/s					
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard					
Selon la procédure standard ASTM D5856-95(2002), le gradient hydraulique maximal recommandé est de 2 pour un sol don't la conductivité hydraulique prédite est à plus de 10-4 cm/s. Au démontage de la cellule, il a été observé que la connexion au bas de la cellule ne fonctionnait pas. Ceci explique pourquoi il n'a pas été possible de vider cette cellule par succion. Il est possible que les valeurs de conductivité hydraulique aient été affectée donc elles ne doivent pas être retenues pour les calculs.					

Tableau J.27 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge constante (23 juillet 2014) #12

Mesures et calculs								
Test no.	Changement de charge (Δh)	Gradient hydraulique (i)	Volume (Q)	Temps (t)	Débit (q)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Porosité pendant l'essai N _{pv}
	cm		cm ³	s	cm ³ /s	cm/s	cm/s	
1	37,2	1,81	-	-				
2	37,2	1,81	0,50	5	0,10	3,20E-04	2,70E-04	0,00
3	37,2	1,81	1,50	10	0,15	4,81E-04	4,04E-04	0,00
4	37,2	1,81	2,01	15	0,13	4,27E-04	3,59E-04	0,00
7	37,2	1,81	4,51	30	0,15	4,81E-04	4,04E-04	0,00
8	37,2	1,81	5,32	35	0,15	4,85E-04	4,08E-04	0,00
9	37,2	1,81	6,12	40	0,15	4,89E-04	4,11E-04	0,00
10	37,2	1,81	6,92	45	0,15	4,91E-04	4,13E-04	0,00
11	37,2	1,81	7,73	50	0,15	4,93E-04	4,15E-04	0,00
12	37,2	1,81	8,63	55	0,16	5,01E-04	4,22E-04	0,00
13	37,2	1,81	9,33	60	0,16	4,97E-04	4,18E-04	0,00
14	37,2	1,81	10,23	65	0,16	5,03E-04	4,23E-04	0,00
15	37,2	1,81	10,94	70	0,16	4,99E-04	4,20E-04	0,00
17	37,2	1,81	12,74	80	0,16	5,09E-04	4,28E-04	0,00
18	37,2	1,81	13,44	85	0,16	5,05E-04	4,25E-04	0,00
19	37,2	1,81	14,15	90	0,16	5,02E-04	4,22E-04	0,00
20	37,2	1,81	15,05	95	0,16	5,06E-04	4,26E-04	0,00
21	37,2	1,81	15,75	100	0,16	5,03E-04	4,23E-04	0,00
22	37,2	1,81	16,45	105	0,16	5,00E-04	4,21E-04	0,00
23	37,2	1,81	17,26	110	0,16	5,01E-04	4,22E-04	0,00
24	37,2	1,81	17,86	115	0,16	4,96E-04	4,17E-04	0,00
25	37,2	1,81	18,56	120	0,15	4,94E-04	4,16E-04	0,00
26	37,2	1,81	19,97	130	0,15	4,90E-04	4,13E-04	0,00
27	37,2	1,81	21,27	140	0,15	4,85E-04	4,08E-04	0,00
28	37,2	1,81	22,57	150	0,15	4,81E-04	4,04E-04	0,00
29	37,2	1,81	23,88	160	0,15	4,77E-04	4,01E-04	0,00
30	37,2	1,81	24,98	170	0,15	4,69E-04	3,95E-04	0,00
31	37,2	1,81	26,29	180	0,15	4,66E-04	3,92E-04	0,00
32	37,2	1,81	27,49	190	0,14	4,62E-04	3,89E-04	0,00
33	37,2	1,81	28,59	200	0,14	4,57E-04	3,84E-04	0,00
34	37,2	1,81	29,60	210	0,14	4,50E-04	3,79E-04	0,00
35	37,2	1,81	30,60	220	0,14	4,44E-04	3,74E-04	0,00
36	37,2	1,81	31,70	230	0,14	4,40E-04	3,70E-04	0,00
37	37,2	1,81	32,61	240	0,14	4,34E-04	3,65E-04	0,00
38	37,2	1,81	35,52	270	0,13	4,20E-04	3,53E-04	0,00
39	37,2	1,81	38,02	300	0,13	4,05E-04	3,41E-04	0,00
40	37,2	1,81	40,53	330	0,12	3,92E-04	3,30E-04	0,00
41	37,2	1,81	42,64	360	0,12	3,78E-04	3,18E-04	0,00
42	37,2	1,81	44,75	390	0,11	3,66E-04	3,08E-04	0,00
43	37,2	1,81	46,55	420	0,11	3,54E-04	2,98E-04	0,00
44	37,2	1,81	48,26	450	0,11	3,42E-04	2,88E-04	0,00
45	37,2	1,81	49,86	480	0,10	3,32E-04	2,79E-04	0,00
46	37,2	1,81	51,37	510	0,10	3,22E-04	2,71E-04	0,00
47	37,2	1,81	52,77	540	0,10	3,12E-04	2,63E-04	0,00
48	37,2	1,81	53,47	570	0,09	3,00E-04	2,52E-04	0,00

Tableau J.28 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge constante (23 juillet 2014) #12
(suite)

50	37,2	1,81	57,39	660	0,09	2,78E-04	2,34E-04	0,00
51	37,2	1,81	60,00	720	0,08	2,66E-04	2,24E-04	0,00
52	37,2	1,81	60,80	780	0,08	2,49E-04	2,09E-04	0,00
53	37,2	1,81	62,40	840	0,07	2,37E-04	2,00E-04	0,00
54	37,2	1,81	63,61	900	0,07	2,26E-04	1,90E-04	0,00
55	37,2	1,81	64,81	960	0,07	2,16E-04	1,81E-04	0,00
56	37,2	1,81	69,43	1 020	0,07	2,17E-04	1,83E-04	0,00
57	37,2	1,81	67,32	1 080	0,06	1,99E-04	1,67E-04	(0,00)
58	37,2	1,81	67,52	1 140	0,06	1,89E-04	1,59E-04	0,00
59	37,2	1,81	68,42	1 200	0,06	1,82E-04	1,53E-04	0,00

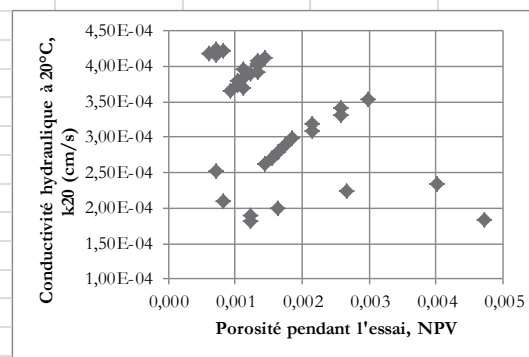
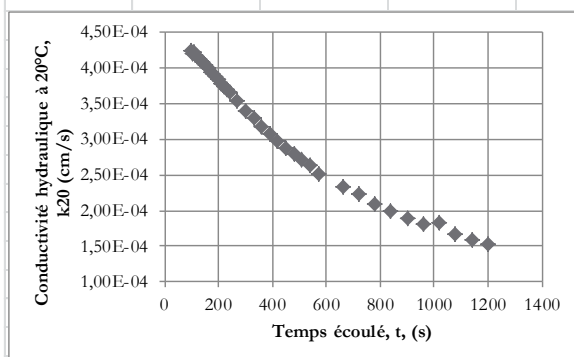


Tableau J.29 : Données de l'essai de perméabilité à charge constante (23 juillet 2014) #13

Conductivité hydraulique à charge constante des roches stériles						
Mine Tio - 0-10mm tamisé						
Échantillon reçu été 2013						
Information générale						
Testé par:	Stéphanie Letourneur					
Laboratoire IRME						
Date testé:	23-juil-14 Essai 2					
Projet:	Cellule #2 pour l'obtention de la teneur en eau résiduelle du sol					
Détails du test						
Diamètre max. particules				10 mm		
Diamètre du moule, D		14,85		cm		
Masse cellule vide et connections, M ₁		7340		g		Mesuré
Masse cellule eau désaéré et connections, M _e		11 779,6		g		Mesuré
Masse cellule sol, air, connections, M ₂		14 982,7		g		
Masse cellule sol, eau, air, connections, M _{tot}		16492,1		g		
Masse sol humide, M _{ms}		8 261,4		g		
Masse sèche du sol, M _s		7 641,70		g		Mesuré
Masse eau, M _{win}		619,70		g		
Masse eau, M _{wf}		619,20		g		
Teneur en eau massique initiale, w _{in}		8,1		%		
Teneur en eau massique finale, w _f		8,1		%		
Densité relative du sol, G _s		2,745				
Indice des vides, e		0,378				
Porosité initial, n		0,274				
Volume des vides, V _v		775,0		cm ³		Mesuré
Volume des pores, V _p		977,1		cm ³		
Volume eau, V _w		621,7		cm ³		
Niveau de saturation		80		%		
Aire de l'échantillon, A		173,13		cm ²		
Longueur de l'échantillon, L _f		20,57		cm		
Volume total, V _t		3 560,52		cm ³		
Température eau, T		26,2		°C		
Densité sèche initial, ρ _{di}		1,99		g/cm ³		
Densité sèche finale, ρ _{df}		1,99		g/cm ³		
Densité de l'eau, ρ _w		0,997		g/cm ³		
Facteur de correction, R _T à 20°C		0,841				
Précision de la balance utilisée:				g		
Méthode de préparation de l'échantillon:						
Moyenne k20		2,9E-04 cm/s				
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard						
Selon la procédure standard ASTM D5856-95(2002), le gradient hydraulique maximal recommandé est de 2 pour un sol don't la conductivité hydraulique prédite est à plus de 10-4 cm/s. Au démontage de la cellule, il a été observé que la connection au bas de la cellule ne fonctionnait pas. Ceci explique pourquoi il n'a pas été possible de vider cette cellule par succion. Il est possible que les valeurs de conductivité hydraulique aient été affectée donc elles ne doivent pas être retenues pour les calculs.						

Tableau J.30 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge constante (23 juillet 2014) #13

Mesures et calculs								
Test no.	Changement de charge (Δh)	Gradient hydraulique (i)	Volume (Q)	Temps (t)	Débit (q)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Porosité pendant l'essai N _{pv}
-	cm		cm ³	s	cm ³ /s	cm/s	cm/s	
1	37,2	1,81	-	-				
2	37,2	1,81	0,50	5	0,10	3,20E-04	2,70E-04	0,00
3	37,2	1,81	1,30	10	0,13	4,16E-04	3,50E-04	0,00
4	37,2	1,81	2,01	15	0,13	4,27E-04	3,59E-04	0,00
7	37,2	1,81	2,81	20	0,14	4,49E-04	3,77E-04	0,00
8	37,2	1,81	3,61	25	0,14	4,61E-04	3,88E-04	0,00
9	37,2	1,81	4,31	30	0,14	4,59E-04	3,86E-04	0,00
10	37,2	1,81	4,92	35	0,14	4,49E-04	3,77E-04	0,00
11	37,2	1,81	5,72	40	0,14	4,57E-04	3,84E-04	0,00
12	37,2	1,81	6,42	45	0,14	4,56E-04	3,83E-04	0,00
13	37,2	1,81	6,92	50	0,14	4,42E-04	3,72E-04	0,00
14	37,2	1,81	7,52	55	0,14	4,37E-04	3,68E-04	0,00
15	37,2	1,81	8,13	60	0,14	4,33E-04	3,64E-04	0,00
16	37,2	1,81	8,73	65	0,13	4,29E-04	3,61E-04	0,00
17	37,2	1,81	9,33	70	0,13	4,26E-04	3,58E-04	0,00
18	37,2	1,81	9,93	75	0,13	4,23E-04	3,56E-04	0,00
19	37,2	1,81	10,63	80	0,13	4,24E-04	3,57E-04	0,00
20	37,2	1,81	11,24	85	0,13	4,22E-04	3,55E-04	0,00
21	37,2	1,81	11,64	90	0,13	4,13E-04	3,47E-04	0,00
22	37,2	1,81	12,14	95	0,13	4,08E-04	3,43E-04	0,00
23	37,2	1,81	12,64	100	0,13	4,04E-04	3,40E-04	0,00
24	37,2	1,81	13,24	105	0,13	4,03E-04	3,39E-04	0,00
25	37,2	1,81	13,74	110	0,12	3,99E-04	3,36E-04	0,00
26	37,2	1,81	14,35	115	0,12	3,98E-04	3,35E-04	0,00
27	37,2	1,81	14,85	120	0,12	3,95E-04	3,32E-04	0,00
28	37,2	1,81	15,95	130	0,12	3,92E-04	3,30E-04	0,00
29	37,2	1,81	16,85	140	0,12	3,84E-04	3,24E-04	0,00
30	37,2	1,81	17,66	150	0,12	3,76E-04	3,16E-04	0,00
31	37,2	1,81	18,66	160	0,12	3,72E-04	3,13E-04	0,00
32	37,2	1,81	19,56	170	0,12	3,67E-04	3,09E-04	0,00
33	37,2	1,81	20,57	180	0,11	3,65E-04	3,07E-04	0,00
34	37,2	1,81	21,27	190	0,11	3,57E-04	3,01E-04	0,00
35	37,2	1,81	22,07	200	0,11	3,52E-04	2,97E-04	0,00
36	37,2	1,81	22,87	210	0,11	3,48E-04	2,93E-04	0,00
37	37,2	1,81	23,68	220	0,11	3,44E-04	2,89E-04	0,00
38	37,2	1,81	24,38	230	0,11	3,38E-04	2,85E-04	0,00
39	37,2	1,81	25,18	240	0,10	3,35E-04	2,82E-04	0,00
40	37,2	1,81	27,39	270	0,10	3,24E-04	2,73E-04	0,00
41	37,2	1,81	29,40	300	0,10	3,13E-04	2,63E-04	0,00
42	37,2	1,81	31,30	330	0,09	3,03E-04	2,55E-04	0,00
43	37,2	1,81	33,11	360	0,09	2,94E-04	2,47E-04	0,00
44	37,2	1,81	34,81	390	0,09	2,85E-04	2,40E-04	0,00
45	37,2	1,81	36,42	420	0,09	2,77E-04	2,33E-04	0,00
46	37,2	1,81	37,82	450	0,08	2,68E-04	2,26E-04	0,00
47	37,2	1,81	39,23	480	0,08	2,61E-04	2,20E-04	0,00
48	37,2	1,81	42,04	540	0,08	2,49E-04	2,09E-04	0,00
49	37,2	1,81	47,96	600	0,08	2,55E-04	2,15E-04	0,01

Tableau J.31 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge constante (23 juillet 2014) #13
(suite)

50	37,2	1,81	50,87	720	0,07	2,26E-04	1,90E-04	0,00
51	37,2	1,81	53,68	900	0,06	1,90E-04	1,60E-04	0,00
52	37,2	1,81	55,88	960	0,06	1,86E-04	1,56E-04	0,00
53	38,2	1,86	57,19	1 020	0,06	1,74E-04	1,47E-04	0,00
54	39,2	1,91	57,89	1 080	0,05	1,62E-04	1,37E-04	0,00
55	40,2	1,95	58,99	1 140	0,05	1,53E-04	1,29E-04	0,00
56	41,2	2,00	60,10	1 200	0,05	1,44E-04	1,22E-04	0,00

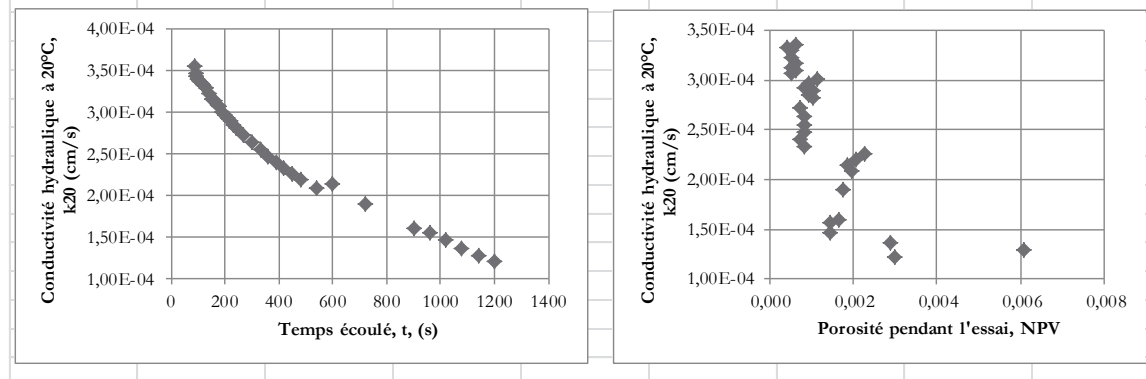


Tableau J.32 : Données de l'essai de perméabilité à charge constante (31 juillet 2014) #14

Conductivité hydraulique à charge constante des roches stériles					
Mine Tio - 0-10mm tamisé					
Échantillon reçu été 2013					
Information générale					
Testé par:	Stéphanie Letourneur				
Laboratoire IRME					
Date testé:	31-juil-14 Essai 3				
Projet:	Cellule #2 pour l'obtention de la teneur en eau résiduelle du sol				
Détails du test					
Diamètre max. particules		10		mm	
Diamètre du moule, D		14,85		cm	
Masse cellule vide et connections, M ₁		7340		g Mesuré	
Masse cellule eau désaéré et connections, M _e		11 779,6		g Mesuré	
Masse cellule sol, air, connections, M ₂		14 982,7		g	
Masse cellule sol, eau, air, connections, M _{tot}		16489,7		g	
Masse sol humide, M _{ms}		8 271,1		g	
Masse sèche du sol, M _s		7 641,70		g Mesuré	
Masse eau, M _{win}		629,36		g	
Masse eau, M _{wf}		633,36		g	
Teneur en eau massique initiale, w _{in}		8,2		%	
Teneur en eau massique finale, w _f		8,3		%	
Densité relative du sol, G _s		2,745			
Indice des vides, e		0,384			
Porosité initial, n		0,278			
Volume des vides, V _v		775,0		cm ³ Mesuré	
Volume des pores, V _p		991,4		cm ³	
Volume eau, V _w		630,9		cm ³	
Niveau de saturation		81		%	
Aire de l'échantillon, A		173,13		cm ²	
Longueur de l'échantillon, L _f		20,62		cm Mesuré	
Volume total, V _t		3 569,90		cm ³	
Température eau, T		23,2		°C	
Densité sèche initial, ρ _{di}		1,98		g/cm ³	
Densité sèche finale, ρ _{df}		1,98		g/cm ³	
Densité de l'eau, ρ _w		0,997		g/cm ³	
Facteur de correction, R _T à 20°C		0,914			
Précision de la balance utilisée:		2		g	
Méthode de préparation de l'échantillon:					
Moyenne k20		2,8E-04		cm/s	
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard					
Selon la procédure standard ASTM D5856-95(2002), le gradient hydraulique maximal recommandé est de 2 pour un sol don't la conductivité hydraulique prédite est à plus de 10-4 cm/s. Au démontage de la cellule, il a été observé que la connection au bas de la cellule ne fonctionnait pas. Ceci explique pourquoi il n'a pas été possible de vider cette cellule par succion. Il est possible que les valeurs de conductivité hydraulique aient été affectée donc elles ne doivent pas être retenues pour les calculs.					

Tableau J.33 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge constante (31 juillet 2014) #14

Mesures et calculs								
Test no.	Changement de charge (Δh)	Gradient hydraulique (i)	Volume (Q)	Temps (t)	Débit (q)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Porosité pendant l'essai N _{pv}
0	cm		cm ³	s	cm ³ /s	cm/s	cm/s	
1	35,9	1,74	-	-				
4	35,9	1,74	0,50	15	0,03	1,11E-04	1,01E-04	0,00
7	35,9	1,74	1,10	20	0,06	1,83E-04	1,67E-04	0,00
8	35,9	1,74	1,60	25	0,06	2,13E-04	1,95E-04	0,00
9	35,9	1,74	2,11	30	0,07	2,33E-04	2,13E-04	0,00
10	35,9	1,74	2,81	35	0,08	2,66E-04	2,43E-04	0,00
11	35,9	1,74	3,31	40	0,08	2,74E-04	2,51E-04	0,00
12	35,9	1,74	3,91	45	0,09	2,88E-04	2,63E-04	0,00
13	35,9	1,74	4,51	50	0,09	2,99E-04	2,74E-04	0,00
14	35,9	1,74	4,91	55	0,09	2,96E-04	2,71E-04	0,00
15	35,9	1,74	5,71	60	0,10	3,16E-04	2,89E-04	0,00
16	35,9	1,74	6,02	65	0,09	3,07E-04	2,81E-04	0,00
17	35,9	1,74	6,62	70	0,09	3,14E-04	2,87E-04	0,00
18	35,9	1,74	7,12	75	0,09	3,15E-04	2,88E-04	0,00
19	35,9	1,74	7,72	80	0,10	3,20E-04	2,93E-04	0,00
20	35,9	1,74	8,32	85	0,10	3,25E-04	2,97E-04	0,00
21	35,9	1,74	8,62	90	0,10	3,18E-04	2,90E-04	0,00
22	35,9	1,74	9,22	95	0,10	3,22E-04	2,94E-04	0,00
23	35,9	1,74	9,62	100	0,10	3,19E-04	2,92E-04	0,00
24	35,9	1,74	10,23	105	0,10	3,23E-04	2,95E-04	0,00
25	35,9	1,74	10,73	110	0,10	3,24E-04	2,96E-04	0,00
26	35,9	1,74	11,23	115	0,10	3,24E-04	2,96E-04	0,00
27	35,9	1,74	11,83	120	0,10	3,27E-04	2,99E-04	0,00
28	35,9	1,74	12,53	130	0,10	3,20E-04	2,92E-04	0,00
29	35,9	1,74	13,73	140	0,10	3,25E-04	2,97E-04	0,00
30	35,9	1,74	14,64	150	0,10	3,24E-04	2,96E-04	0,00
31	35,9	1,74	15,64	160	0,10	3,24E-04	2,96E-04	0,00
32	35,9	1,74	16,54	170	0,10	3,23E-04	2,95E-04	0,00
33	35,9	1,74	17,54	180	0,10	3,23E-04	2,96E-04	0,00
34	35,9	1,74	18,55	190	0,10	3,24E-04	2,96E-04	0,00
35	35,9	1,74	19,45	200	0,10	3,23E-04	2,95E-04	0,00
36	35,9	1,74	20,45	210	0,10	3,23E-04	2,95E-04	0,00
37	35,9	1,74	21,15	220	0,10	3,19E-04	2,92E-04	0,00
38	35,9	1,74	22,16	230	0,10	3,20E-04	2,92E-04	0,00
39	35,9	1,74	23,06	240	0,10	3,19E-04	2,91E-04	0,00
40	35,9	1,74	25,76	270	0,10	3,17E-04	2,89E-04	0,00
41	35,9	1,74	28,47	300	0,09	3,15E-04	2,88E-04	0,00
42	35,9	1,74	30,88	330	0,09	3,10E-04	2,84E-04	0,00
43	35,9	1,74	33,78	360	0,09	3,11E-04	2,85E-04	0,00
44	35,9	1,74	36,29	390	0,09	3,09E-04	2,82E-04	0,00
45	35,9	1,74	39,00	420	0,09	3,08E-04	2,82E-04	0,00
46	35,9	1,74	41,50	450	0,09	3,06E-04	2,80E-04	0,00
47	35,9	1,74	43,91	480	0,09	3,03E-04	2,77E-04	0,00
48	35,9	1,74	46,72	510	0,09	3,04E-04	2,78E-04	0,00
49	35,9	1,74	48,92	540	0,09	3,01E-04	2,75E-04	0,00

Tableau J.34 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge constante (31 juillet 2014) #14
(suite)

50	35,9	1,74	51,33	570	0,09	2,99E-04	2,73E-04	0,00
51	35,9	1,74	53,83	600	0,09	2,98E-04	2,72E-04	0,00
52	35,9	1,74	58,65	660	0,09	2,95E-04	2,69E-04	0,00
53	35,9	1,74	63,26	720	0,09	2,91E-04	2,66E-04	0,00
54	35,9	1,74	68,37	780	0,09	2,91E-04	2,66E-04	0,01
55	35,9	1,74	72,98	840	0,09	2,88E-04	2,63E-04	0,00
56	35,9	1,74	77,39	900	0,09	2,85E-04	2,61E-04	0,00
57	36,9	1,79	80,40	960	0,08	2,70E-04	2,47E-04	0,00
58	37,9	1,84	82,21	1 020	0,08	2,53E-04	2,31E-04	0,00
59	38,9	1,89	82,61	1 080	0,08	2,34E-04	2,14E-04	0,00
60	39,9	1,94	83,01	1 140	0,07	2,17E-04	1,99E-04	0,00
61	40,9	1,98	83,21	1 200	0,07	2,02E-04	1,85E-04	0,00
62	41,9	2,03	83,21	1 260	0,07	1,88E-04	1,72E-04	-

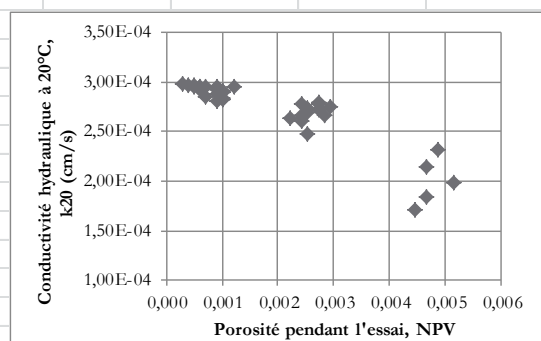
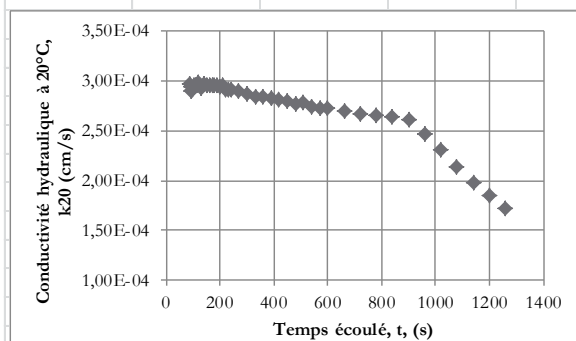
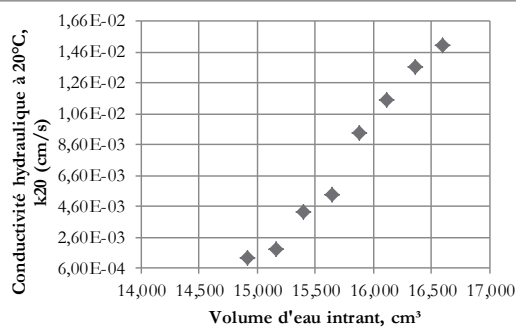
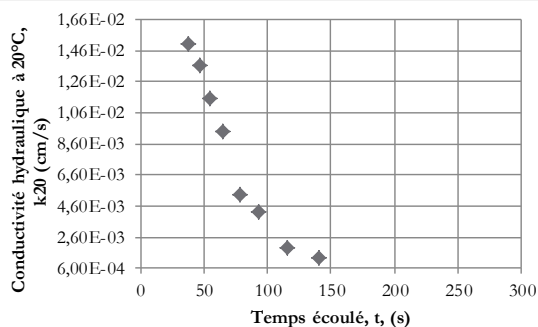


Tableau J.35 : Données de l'essai de perméabilité à charge variable (24 juillet 2014) #15

Conductivité hydraulique à charge variable des roches stériles						
Mine Tio - 0-10mm tamisé						
Échantillon reçu été 2013						
Information générale						
Testé par:	Stéphanie Letourneur					
Laboratoire	IRME					
Date testé:	24-juil-14 Essai 1					
Projet:	Cellule #2 pour l'obtention de la teneur en eau résiduelle du sol					
Détails du test						
Diamètre max. particules					10 mm	
Diamètre du moule, D					14,85 cm	
Masse cellule vide et connections, M ₁					7340 g	Mesuré
Masse cellule eau désaéré et connections, M _e					11 779,6 g	Mesuré
Masse cellule sol, air, connections, M ₂					14 982,7 g	
Masse cellule sol, eau, air, connections, M _{tot}					16489,7 g	inconnu
Masse sol humide, M _{ms}					8 259,8 g	
Masse sèche du sol, M _s					7 641,70 g	Mesuré
Masse eau, M _{win}					618,05 g	inconnu
Masse eau, M _{wf}					622,05 g	inconnu
Teneur en eau massique initiale, w _{in}					8,1 %	Estimé
Teneur en eau massique finale, w _f					8,1 %	Estimé
Densité relative du sol, G _s					2,745	
Indice des vides, e					0,378	
Porosité initial, n					0,274	
Volume des vides, V _v					775,0 cm ³	Mesuré
Volume des pores, V _p					977,1 cm ³	
Volume eau, V _w					619,9 cm ³	
Niveau de saturation					80 %	
Aire de l'échantillon, A					173,13 cm ²	
Longueur de l'échantillon, L _f					20,57 cm	
Volume total, V _t					3 560,52 cm ³	
Aire du réservoir intrant, a _{in}					5,35 cm ²	
Aire du réservoir extrant, a _{out}					5,12 cm ²	
Température eau, T					25,4 °C	
Densité sèche initial, ρ _{di}					1,99 g/cm ³	
Densité sèche finale, ρ _{df}					1,98 g/cm ³	
Densité de l'eau, ρ _w					0,997 g/cm ³	
Facteur de correction, R _T à 20°C					0,860	
Précision de la balance utilisée:					g	
Méthode de préparation de l'échantillon:					Méthode D	
Moyenne k20					1,1E-02 cm/s	
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard						
Selon la procédure standard ASTM D5856-95(2002), le gradient hydraulique maximal recommandé est de 2 pour un sol don't la conductivité hydraulique prédite est à plus de 10-4 cm/s. Au démontage de la cellule, il a été observé que la connexion au bas de la cellule ne fonctionnait pas. Ceci explique pourquoi il n'a pas été possible de vider cette cellule par succion. Il est possible que les valeurs de conductivité hydraulique aient été affectée donc elles ne doivent pas être retenues pour les calculs.						

Tableau J.36 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge variable (24 juillet 2014) #15

Mesures et calculs								
Test no.	Charge initiale (H ₁)	Gradient hydraulique initial (i _i)	Charge finale (H ₂)	Temps (t)	Δ Temps (Δt)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Volume d'eau intrant
	cm		cm	s	s	cm/s	cm/s	cm ³
0	53,00	2,58	22,80	0				
1	52,00	2,53	24,00	0,69	0,69	3,48E-01	3,00E-01	17,8
2	51,00	2,48	24,90	6,15	5,46	4,08E-02	3,51E-02	17,6
3	50,00	2,43	25,90	10,85	4,70	4,35E-02	3,74E-02	17,3
4	49,00	2,38	26,90	17,06	6,21	3,00E-02	2,58E-02	17,1
5	48,00	2,33	27,60	29,03	11,97	1,44E-02	1,24E-02	16,8
6	47,00	2,29	28,80	37,72	8,69	1,75E-02	1,51E-02	16,6
7	46,00	2,24	29,80	46,23	8,51	1,59E-02	1,36E-02	16,4
8	45,00	2,19	30,70	55,12	8,89	1,34E-02	1,15E-02	16,1
9	44,00	2,14	31,50	64,64	9,52	1,09E-02	9,38E-03	15,9
10	43,00	2,09	32,60	78,4	13,76	6,25E-03	5,38E-03	15,6
11	42,00	2,04	33,60	92,57	14,17	4,89E-03	4,21E-03	15,4
12	41,00	1,99	34,80	115,85	23,28	2,19E-03	1,88E-03	15,2
13	40,00	1,94	35,50	140,71	24,86	1,49E-03	1,28E-03	14,9
14	39,00	1,90	36,60	186,14	45,43	4,34E-04	3,74E-04	14,7
15	38,00	1,85	37,50	281,17	95,03	4,33E-05	3,72E-05	14,4



Correction H0 -0,0001 cm

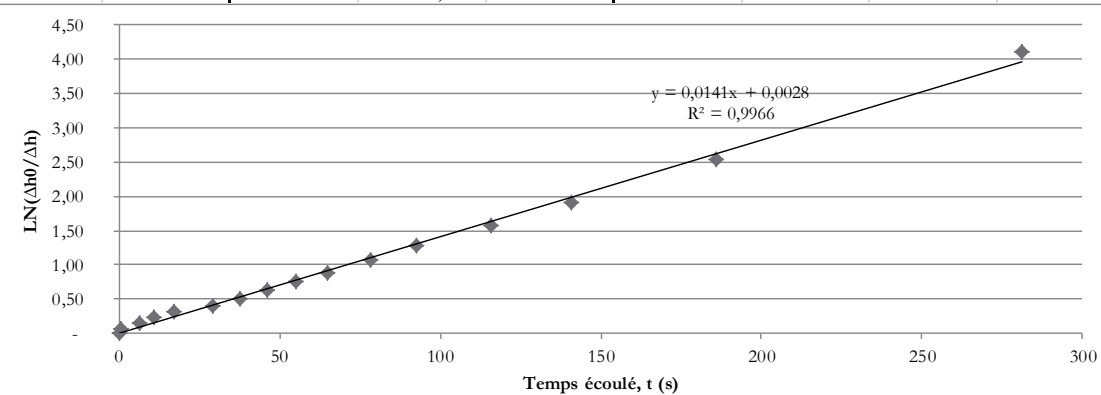


Tableau J.37 : Données de l'essai de perméabilité à charge variable (24 juillet 2014) #16

Conductivité hydraulique à charge variable des roches stériles					
Mine Tio - 0-10mm tamisé					
Échantillon reçu été 2013					
Information générale					
Testé par:	Stéphanie Letourneur				
Laboratoire	IRME				
Date testé:	24-juil-14 Essai 2				
Projet:	Cellule #2 pour l'obtention de la teneur en eau résiduelle du sol				
Détails du test					
Diamètre max. particules			10	mm	
Diamètre du moule, D			14,85	cm	
Masse cellule vide et connexions, M ₁			7340	g	Mesuré
Masse cellule eau désaéré et connexions, M _e			11 779,6	g	Mesuré
Masse cellule sol, air, connexions, M ₂			14 982,7	g	
Masse cellule sol, eau, air, connexions, M _{tot}			16489,7	g	inconnu
Masse sol humide, M _{ms}			8 260,5	g	
Masse sèche du sol, M _s			7 641,70	g	Mesuré
Masse eau, M _{win}			618,78	g	inconnu
Masse eau, M _{wf}			622,78	g	inconnu
Teneur en eau massique initiale, w _{in}			8,1	%	Estimé
Teneur en eau massique finale, w _f			8,1	%	Estimé
Densité relative du sol, G _s			2,745		
Indice des vides, e			0,379		
Porosité initial, n			0,275		
Volume des vides, V _v			775,0	cm ³	Mesuré
Volume des pores, V _p			977,8	cm ³	
Volume eau, V _w			620,5	cm ³	
Niveau de saturation			80	%	
Aire de l'échantillon, A			173,13	cm ²	
Longueur de l'échantillon, L _f			20,57	cm	
Volume total, V _t			3 560,52	cm ³	
Aire du réservoir intrant, a _{in}			5,35	cm ²	
Aire du réservoir extrant, a _{out}			5,12	cm ²	
Température eau, T			24,6	°C	
Densité sèche initial, ρ _{di}			1,99	g/cm ³	
Densité sèche finale, ρ _{df}			1,98	g/cm ³	
Densité de l'eau, ρ _w			0,997	g/cm ³	
Facteur de correction, R _T à 20°C			0,879		
Précision de la balance utilisée:				g	
Méthode de préparation de l'échantillon:	Méthode D				
Moyenne k20	1,8E-02 cm/s				
Notes, observations et déviations de la norme ASTM D2434 test standard					
Selon la procédure standard ASTM D5856-95(2002), le gradient hydraulique maximal recommandé est de 2 pour un sol don't la conductivité hydraulique prédite est à plus de 10-4 cm/s. Au démontage de la cellule, il a été observé que la connexion au bas de la cellule ne fonctionnait pas. Ceci explique pourquoi il n'a pas été possible de vider cette cellule par succion. Il est possible que les valeurs de conductivité hydraulique aient été affectée donc elles ne doivent pas être retenues pour les calculs.					

Tableau J.38 : Mesures de l'essai de perméabilité à charge variable (24 juillet 2014) #16

Mesures et calculs								
Test no.	Charge initiale (H ₁)	Gradient hydraulique initial (i _i)	Charge finale (H ₂)	Temps (t)	Δ Temps (Δt)	Conductivité hydraulique (k)	Conductivité hydraulique à 20°C (k ₂₀)	Volume d'eau intrant
	cm		cm	s	s	cm/s	cm/s	cm ³
0	57,00	2,77	18,80	0				
1	56,00	2,72	20,00	4,48	4,48	7,14E-02	6,28E-02	18,8
2	55,00	2,67	20,80	8,96	4,48	6,74E-02	5,93E-02	18,5
3	54,00	2,63	21,80	13,54	4,58	6,15E-02	5,41E-02	18,3
4	53,00	2,58	22,70	18,34	4,80	5,49E-02	4,83E-02	18,0
5	52,00	2,53	23,80	23,88	5,54	4,38E-02	3,85E-02	17,8
6	51,00	2,48	24,90	30,11	6,23	3,58E-02	3,14E-02	17,6
7	50,00	2,43	25,90	36,68	6,57	3,11E-02	2,74E-02	17,3
8	49,00	2,38	26,90	43,42	6,74	2,76E-02	2,43E-02	17,1
9	48,00	2,33	27,80	49,82	6,40	2,65E-02	2,33E-02	16,8
10	47,00	2,29	28,70	57,93	8,11	1,89E-02	1,66E-02	16,6
11	46,00	2,24	29,60	66,78	8,85	1,55E-02	1,36E-02	16,4
12	45,00	2,19	30,70	77,41	10,63	1,12E-02	9,83E-03	16,1
13	44,00	2,14	31,50	87,65	10,24	1,01E-02	8,92E-03	15,9
14	43,00	2,09	32,60	102,28	14,63	5,88E-03	5,17E-03	15,6
15	42,00	2,04	33,80	120,29	18,01	3,75E-03	3,30E-03	15,4
16	41,00	1,99	34,70	139,34	19,05	2,72E-03	2,39E-03	15,2
17	40,00	1,94	35,60	165,87	26,53	1,36E-03	1,20E-03	14,9
18	39,00	1,90	36,60	210,36	44,49	4,44E-04	3,90E-04	14,7
19	38,00	1,85	37,40	331,31	120,95	4,09E-05	3,60E-05	14,4